

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский авиационный институт»
Национальный исследовательский университет

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

Научный совет РАН по комплексной проблеме «Механика»

Научный совет РАН по механике деформируемого твердого тела

МЕЖДУНАРОДНАЯ МОЛОДЁЖНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«XLV ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ»

16-19 апреля 2019

СБОРНИК ТРУДОВ

СЕКЦИИ

Механика и моделирование материалов и технологий

МОСКВА, 2019

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский авиационный институт»
Национальный исследовательский университет**

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН**

Механика и моделирование материалов и технологий. Сборник трудов Секции
Международной молодёжной научной конференции «XLV Гагаринские чтения»
16-19 апреля 2019, Москва, ИПМех РАН, 2019.-198 с.

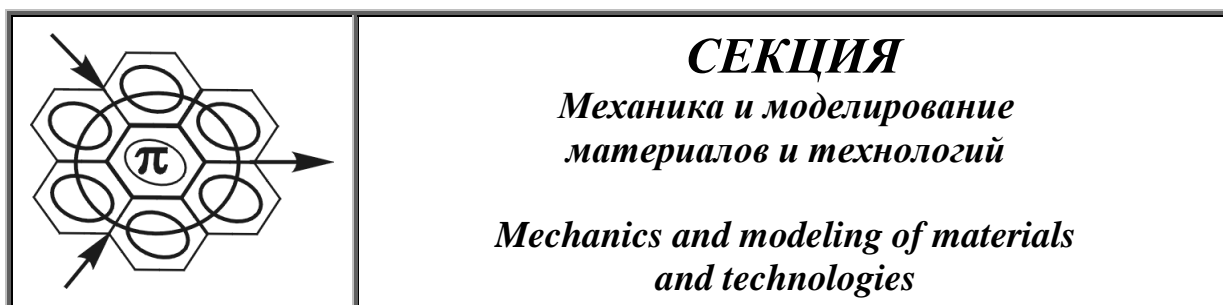
Сборник содержит материалы докладов, представленных на заседаниях Секции
Механика и моделирование материалов и технологий Международной молодёжной
научной конференции "XLV Гагаринские чтения".

ISBN 978-5-91741-244-3
055(02)2 © Институт проблем механики РАН 2019 г.

Работы представлены по следующим научным направлениям:

- Модели материалов (в том числе наноматериалов, материалов с памятью формы).
- Методы определения свойств материалов.
- Связи макроскопических свойств материалов с их структурой.
- Механика и расчетно-экспериментальное моделирование технологических процессов: механика технологических процессов (модели, методы расчета, пакеты программ).
- Экспериментальная механика деформируемого твердого тела.
- Расчет и моделирование напряженного состояния, прочности и разрушения элементов конструкций.

**МЕЖДУНАРОДНАЯ МОЛОДЁЖНАЯ НАУЧНАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ
«XLV ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ»**



**Руководители
секции:** *Климов Дмитрий Михайлович, г.н.с. лаборатории радиационной
газовой динамики ИПМех РАН,
Академик РАН*

*Беклемишев Нил Нилович, зав. кафедрой «Физика
конструкционных материалов» МАИ (НИУ),
Заслуженный деятель науки РФ, проф., д.ф.-м.н.*

**Учёный
секретарь:** *Лямина Елена Алексеевна
с.н.с. ИПМех РАН, к.ф.-м.н.
e-mail: gagarin@ipmnet.ru*

**Члены
локального
оргкомитета:** *Волков М. А., к.ф.-м.н., н.с
Георгиевский Д. В., профессор РАН, д.ф.-м.н., с.н.с.
Капцов А. В., доц., к.ф.-м.н., с.н.с.
Каспарова Е. А., прогр.
Кузнецов С. В., проф. д.ф.-м.н., в.н.с.
Лебедев И. М., м.н.с.
Лисовенко Д. С., к.ф.-м.н., с.н.с.
Мокряков В. В., к.ф.-м.н., н.с.
Мурашкин Е.В., к.ф.-м.н., с.н.с.
Паршин Д. А., доц., к.ф.-м.н., с.н.с.
Попов А. Л., проф., д.ф.-м.н., в.н.с.
Устинов К. Б., доц., д.ф.-м.н., с.н.с.
Ченцов А. В., к.ф.-м.н., с.н.с.
Шифрин Е. И., д.ф.-м.н., г.н.с.*

Секция «Механика и моделирование материалов и технологий» создана в 1990е годы на основе базовой кафедры МАТИ в Институте проблем механики РАН (ИПМех РАН). Одним из создателей и соруководителем Секции был Роберт Вениаминович Гольдштейн (07.05.1940 – 24.09.2017), выдающийся ученый в области механики деформируемого твердого тела и ее приложений в технике и технологии, один из крупнейших отечественных ученых в механике прочности и разрушения конструкционных материалов. Приоритетом для Роберта Вениаминовича была поддержка и продвижение молодежной науки. За время работы секции более 600 участников – школьников, студентов, аспирантов и молодых ученых, - выступили с докладами. В дальнейшем многие из них остались в науке, защитили кандидатские и докторские диссертации, активно сотрудничают с лабораториями ИПМех РАН, и продолжают традиции молодежной науки в качестве научных руководителей. Вокруг секции за время ее существования сложился круг постоянных участников - ВУЗов и организаций, которые из года в год, вот уже несколькими поколениями студентов и аспирантов участвуют в проведении заседаний секции.

Память о Роберте Вениаминовиче Гольдштейне, выдающемся ученом и организаторе науки, навсегда сохранится в наших сердцах.

В настоящем сборнике содержатся материалы докладов, представленных на заседаниях Секции «Механика и моделирование материалов и технологий» Международной молодежной научной конференции «XLV Гагаринские чтения».

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СИЛОВОГО ЭЛЕМЕНТА КОНСОЛЬНОЙ ЧАСТИ КРЫЛА САМОЛЕТА ПО КРИТЕРИЮ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ

Абрикосова Т.М., Счастливцев В.В.

Научный руководитель — доцент, к.т.н. Петухов Ю.В.

Московский авиационный институт, г. Москва

E-mail: elletania19@gmail.com

Одной из основных задач современной техники является увеличение срока службы и надежности деталей и изделий. Решение этой задачи невозможно без понимания процессов усталостного разрушения и внедрения в промышленность методов контроля материалов и изделий без разрушения. Характер изменения напряжений в деталях машин в процессе эксплуатации можно разделить на регулярный и нерегулярный. Наибольшее распространение на практике имеет случайное нагружение, при котором процесс изменения напряжений во времени является случайным. В процессе действия на изделие случайных нагрузок неминуемо возникают микроскопические нарушения целостности материала, которые впоследствии преобразуются в усталостные трещины. Для своевременного предотвращения развития усталостных трещин и отказа силового элемента, необходим постоянный анализ работоспособности изделия, заключающийся в контроле целостности деталей. Методики, позволяющие безошибочно определить начало развития усталостных дефектов материала без разрушения образца получили название Методики неразрушающего контроля. Виды неразрушающего контроля отличаются большим разнообразием применяемых физических принципов и, следовательно, технических средств. Простотой устройств и легкостью расшифровки отличаются магнитно-порошковые методы. Масштабность применения магнитно-порошкового метода объясняется его высокой производительностью, наглядностью результатов контроля и высокой чувствительностью. Задачей ультразвуковой дефектоскопии является отыскание дефектов в изделиях с помощью излучения и приема ультразвуковых волн. Излучение и регистрация ультразвуковых волн осуществляются путем преобразования электрических сигналов в ультразвуковые и обратно. Полученные данные можно использовать для анализа и понимания характера дальнейшего разрушения образцов. Один из ярких примеров использования таких данных – это прогноз роста усталостной трещины, необходимый для своевременного предотвращения появления усталостного разрушения. С помощью методики оценки роста усталостной трещины определяем число циклов до разрушения, используя численные методы интегрирования. Как итог расчетов получаем спрогнозированное число циклов до разрушения. Данные этих расчетов носят лишь приблизительный характер и нуждаются в теоретической и экспериментальной проверке. Для более глубокого понимания сути появления усталостной трещины и получения более точного числа циклов нагружения до разрушения образца, необходимо провести теоретические расчеты, в которых будут учтены все параметры, влияющие на ресурсную долговечность материала и рассмотрены участки детали являющиеся концентраторами напряжений. В качестве деталей будут рассматриваться два болта, находящиеся в консольной части крыла, сделанный из 30ХГСН2А и в пилоне навески двигателя, сделанный из Стали 45. Болты имеют два наиболее опасных участка, которые разрушатся в первую очередь. Галтельный переход является одним из них. Радиус галтельного перехода ρ напрямую влияет на усталостную долговечность образца. В авиационной технике нашли широкое применение технологические методы поверхностного упрочнения, существенно (от 1,5...3 раз) увеличивающие пределы усталости материала, и от 5 и более (до 1000) раз увеличивающие долговечность детали. Получив пределы усталости для каждого варианта, узнаем напряжения, при которых начнется распространение трещины. На основании расчетов были построены функции распределения долговечности. Для образцов из 30ХГСН2А были использованы разные методы упрочняющей обработки. Для образцов из Стали 45 различными были радиусы галтельного перехода. Исходя из функции распределения долговечности и вероятности разрушения образца в 50% получим разные количества циклов нагружения до разрушения. Имея данные стендовых испытаний,

необходимо провести сравнения полученных величин. Сравнивая количество летных часов до разрушения образца, полученное в ходе эксперимента, с расчетными данными и данными прогноза, получим величину отклонения значений данных прогноза от экспериментальных и расчетных данных. Отклонение существует из-за того, что прогнозирование развития усталостной трещины не дает точной картины вследствие несовершенства методов неразрушающего контроля. В результате полученного опыта в промышленности было установлено, что неразрушающие методы контроля могут быть использованы для сокращения времени производственного процесса, устранения промышленного брака и сохранения высокой продуктивности промышленных процессов. Были проведены расчеты количества циклов нагружения до разрушения с помощью теоретического метода и с помощью метода прогнозирования на основе анализа скорости развития усталостной трещины. В ходе прогнозирования были применены различные методы неразрушающего контроля для определения начальной длины трещины и определения более точного способа получения исходных данных. Данные были сравнены с экспериментальными показателями и была установлена зависимость между полученными результатами.

ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЛОИСТЫХ СРЕД

Аверсьева А.В.¹, Кузнецов С.В.^{1,2}

¹МГСУ, кафедра сопротивления материалов

²Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

E-mail: pristanskaia@mail.ru

В работе представлены основные результаты исследования влияния физико-механических характеристик (коэффициента Пуассона) и геометрических параметров (толщины слоя) на распространение волн Лэмба в однослойных и многослойных системах.

Наибольший интерес в неразрушающей диагностике представляет применение поверхностных волн (в частности волн Лэмба) для определения физико-механических и геометрических свойств многослойных конструкций. Несмотря на большое количество научных публикаций [1-7] и исследований по распространению поверхностных волн в различных материалах, имеется ряд нерешенных проблем в вопросах построения аналитических решений для многослойных сред, что приводит к сложности проведения диагностики и обработки результатов экспериментальных исследований. Существующие методы расчета не позволяют достаточно просто получить необходимые корреляционные зависимости между параметрами акустической волны (например, скоростью) и физико-механическими и геометрическими характеристиками материала, поэтому точность проведения экспериментальной диагностики по-прежнему сильно зависит от опыта и квалификации персонала. Сравнение экспериментально полученных дисперсионных соотношений с найденными теоретически позволит определить свойства любого из внутренних слоев и существенно облегчит обработку результатов, полученных экспериментально.

Одним из перспективных направлений применения волн Лэмба в неразрушающей диагностике является использование дисперсионных кривых для определения толщины слоя в однослойной или многослойной системе.

На основе шестимерного комплексного формализма Коши исследованы дисперсионные кривые волн Лэмба, распространяющихся в одиночном изотропном и ортотропном слоях при вариации физико-механических и геометрических характеристик.

Влияние толщины слоя на скорость распространения волн Лэмба в изотропном слое толщиной $2h$ представлено на рисунке 1.

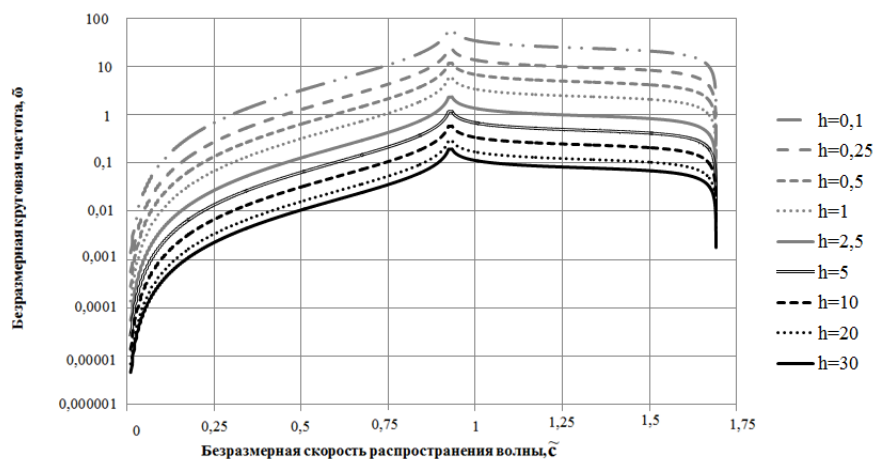


Рис.1 Фундаментальные моды дисперсионных кривых для волн Лэмба в изотропном слое при вариации толщины.

При помощи комбинированного метода, включающего шестимерный комплексный формализм Коши и метод передаточных матриц Томсона-Хаскела, получены и исследованы

дисперсионные кривые для фундаментальных мод волн Лэмба, распространяющихся в слоисто-неоднородном слое при вариации физико-механических и геометрических характеристик одного из внутренних слоев.

Влияние толщины одного из слоев в двухслойной системе на скорость распространения волн Лэмба представлено на рисунке 2.

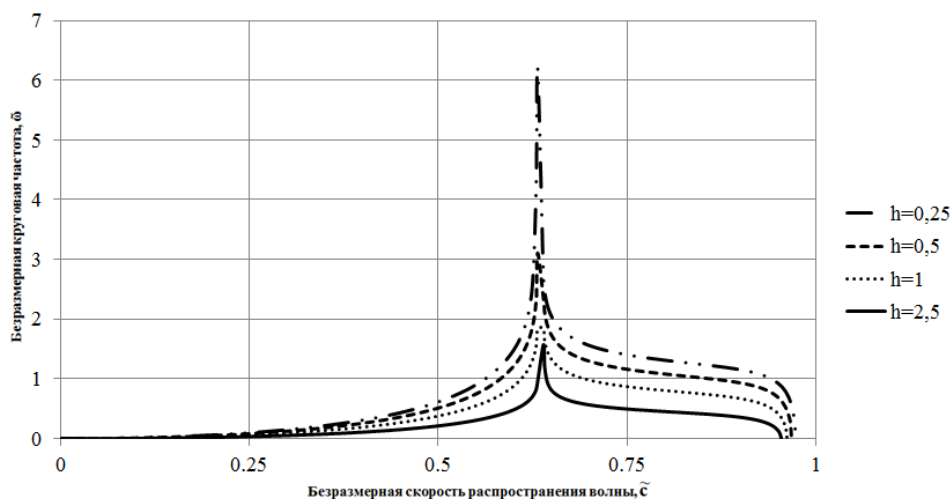


Рис.2 Фундаментальные моды дисперсионных кривых для волн Лэмба в двухслойной системе при вариации толщины одного из слоев.

Показано, что вариация физических характеристик и геометрии любого из внутренних слоев приводит к вариации дисперсионных кривых. Это открывает возможности применения дисперсионного анализа для неразрушающей диагностики свойств отдельных слоев.

Результаты настоящих исследований необходимы для применения волн Лэмба в качестве акустического метода неразрушающей диагностики пластинчатых элементов строительных конструкций.

Литература

- 1.Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973, 343 с.
- 2.Викторов И.А. Ультразвуковые волны Лэмба. Обзор // Акуст.журн.,1965, Т.11, С.1-18.
- 3.Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэля и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966, 168 с.
- 4.Ewing W.M., Jardetzky W.S., Press F., Elastic waves in layered media. McGraw-hill book company,New-york, Toronto, London, 1957, 390 p.
- 5.Lamb H., On Waves in an Elastic Plate. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 93(648), 1917, pp. 114-128
- 6.Rayleigh, J. W., On waves propagated along the plane surface of an elastic solid, Proc. Lond. Math. Soc., Vol. 17, 1885, pp.4-11
- 7.Rose J.L. Ultrasonic Guided Waves in Solid Media, Cambridge University Press: Cambridge, 2014, 547 p.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕЛИНЕЙНО-УПРУГОЙ МОДЕЛИ В ОПЫТЕ НА ИНДЕНТИРОВАНИЕ

Астапов Ю.В.

Научный руководитель – проф., д.ф.-м.н. Маркин А.А.

ТулГУ, ВММ.

Email: ast3x3@gmail.com

Элементы, изготовленные из современных полимерных материалов и работающие в условиях квазистатического деформирования, являются основой многих ответственных механизмов. Точность описания напряженно-деформированного состояния таких деталей при конечных деформациях играет решающую роль при их конструировании. Однозначных рекомендаций по выбору типа определяющих соотношений для корректного описания отклика в системах с резиноподобными элементами не существует. Использование в качестве меры деформаций логарифмического тензора Генки особенно удобно при описании материалов с существенно различными откликами на изменение объема и формы. В работе [1] был предложен вариант обобщения линейной модели материала Генки. Модель содержит пять упругих констант: K , G , C_1 , C_2 , C_3 , причем, если предположить слабую сжимаемость материала, определению подлежат только две из них: G и C_3 .

В последнее время все больше исследователей используют эксперимент на индентирование для определения упругих констант [2] благодаря относительной простоте постановки опыта и, зачастую, недостаточным представленным объемом материала, не позволяющим поставить опыт другого рода. Обработка эксперимента на индентирование сводится к необходимости решения начально-краевой задачи со смешанными граничными условиями контактного типа. В данной работе в качестве уравнений движения используется условие равновесного протекания процесса деформирования [1], требующего равенства нулю не только главного вектора приложенных к телу нагрузок, но и скорости его изменения. Дискретизация полученной вариационной постановки осуществляется методами конечных элементов и пошагового нагружения. Предложенная численная модель позволяет моделировать осесимметричный отклик образцов при воздействии штампов произвольной формы.

Константы модели G и C_3 для натурального каучука определялись из опыта на одноосное сжатие выборки цилиндрических образцов на стенде кинематического нагружения. Определенные с использованием аналитического решения задачи константы использовались при решении задачи о внедрении сферического индентора в упругую плиту. Результаты численного решения продемонстрировали хорошее соответствие данным, полученным из натурального эксперимента.

Для определения констант модели G и C_3 непосредственно из опыта на индентирование была использована модификация метода поиска безусловного минимума Хука-Дживса, в котором целевой функцией выступает среднеквадратичное отклонение осевого усилия от усредненного значения, полученного из эксперимента.

Полученные результаты демонстрируют общую методику определения упругих констант нелинейно-упругой модели из опытов на индентирование.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (18-31-20053).

Литература

1. Астапов, Ю.В. Численное и экспериментальное моделирование процесса индентирования резиновых образцов / Ю.В. Астапов, Д.В. Христоч // Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева Серия: Механика предельного состояния. – 2018. – № 2 (36). – С. 65–73.
2. Zhang M. G. Spherical indentation method for determining the constitutive parameters of hyperelastic soft materials / M. G. Zhang, Y. P. Cao, G. Y. Li., X. Q. Feng // Biomech. Model Mechanobiol. – 2014. – V. 13. – P. 1–11.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Бабарыкин В.А.², Гета О.А.²

Научный руководитель: Никитин И.С.¹

¹ИАП РАН, ²МАИ НИУ

E-mail: leshiy.babarikin@yandex.ru

При расчете деталей конструкции авиационных двигателей на долговечность особое место занимает расчет напряжённо-деформированного состояния (НДС) компрессора газотурбинного двигателя (ГТД): отдельно рассматриваемая система, состоящая из диска компрессора и лопаток, подвергается воздействиям со стороны набегающего воздушного потока и центробежной силы, вызванной большими скоростями вращения данной системы. Сложность расчета НДС в данном случае состоит в том, что необходимо учесть контактное взаимодействие между лопатками и диском компрессора, наряду с циклическим воздействием вышеперечисленных нагрузок (циклом в таком случае будет являться полетный цикл нагружения — ПЦН). Таким образом, усталостное разрушение будет происходить в режиме малоциклового усталости (МЦУ), напряженно-деформированное состояние получено в [1] и проанализировано в [2]. Но в реальных условиях эксплуатации существует ещё одно циклическое воздействие на лопатки компрессора ГТД — низкоамплитудное осевое воздействие, при котором наблюдаются высокочастотные колебания лопаток ГТД. Возмущения напряженного состояния относительно невелики, но число циклов при высокой частоте колебаний за время эксплуатации может достичь величины $N = 10^9 - 10^{10}$. Из современных представлений о поведении материала при $N > 10^8$ данное число циклов может привести к усталостному разрушению для более низких значений напряжений, чем классический предел усталости [3]. В данном случае, появляется необходимость исследовать режим сверхмногоциклового усталости (СВМУ), в результате чего оценить долговечность компрессора ГТД при высокочастотных колебаниях лопаток. Для решения задачи произведено моделирование геометрии диска компрессора и лопаток (рис.1), закрепление которых осуществлено при помощи крепления «ласточкин хвост» (рис.2) и удерживающего штифта; построена конечно-элементная модель, позволяющая рассчитать НДС компрессора ГТД при воздействии центробежных сил, давлении со стороны газового потока, контактного взаимодействия элементов компрессора (с учетом трения в местах контакта) и при низкоамплитудных крутильных воздействиях.

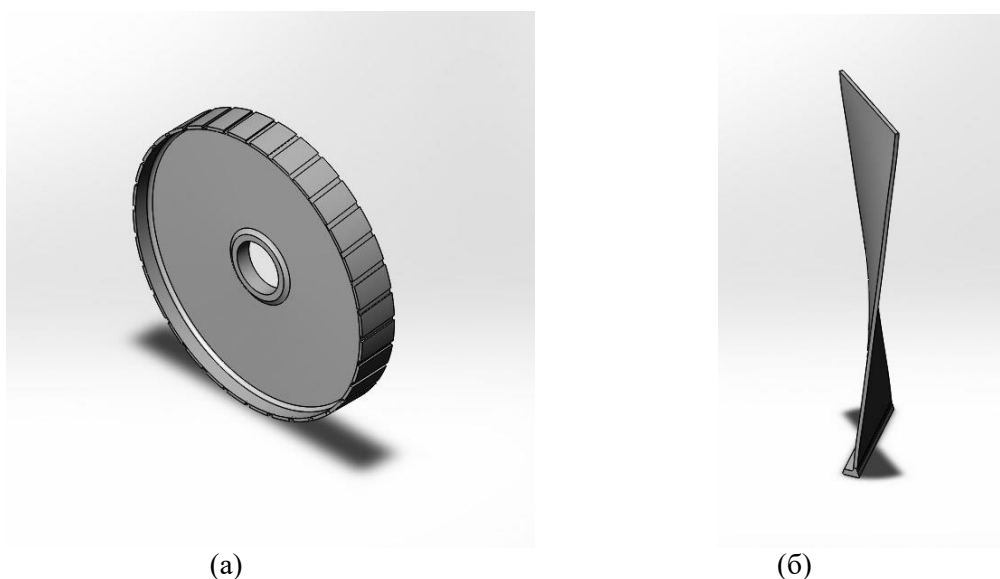


Рис.1 Модель диска компрессора (а) и лопатки компрессора (б)

Расчёт проводится в два этапа:

1. рассчитывается напряженно-деформированное состояние целого диска с лопатками на относительно грубой сетке;
2. далее, выделяется отдельный сектор, состоящий из части диска компрессора и одной лопатки (рис.3); пользуясь результатами первого этапа, находятся перемещения для границ сектора диска и применяются на данном этапе как граничные условия; после этого производится расчет напряженно-деформированного состояния сектора диска с учётом высокочастотных крутильных колебаний лопатки.

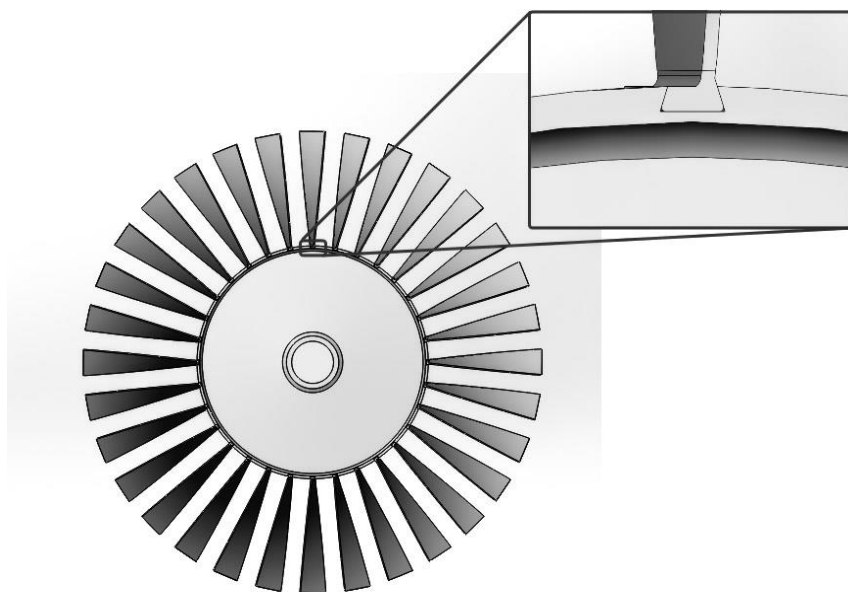


Рис.2 Модель компрессора ГТД в сборке; крепление «ласточкин хвост»

В работе представлены результаты моделирования высокочастотных крутильных колебаний лопаток компрессора ГТД с указанной процедурой расчётов в два этапа, проанализировано полученное напряженно-деформированное состояние, в диске компрессора выявлены зоны критических напряжений, даны оценки долговечности деталей конструкции компрессора ГТД в МЦУ и СВМУ режимах нагружения.

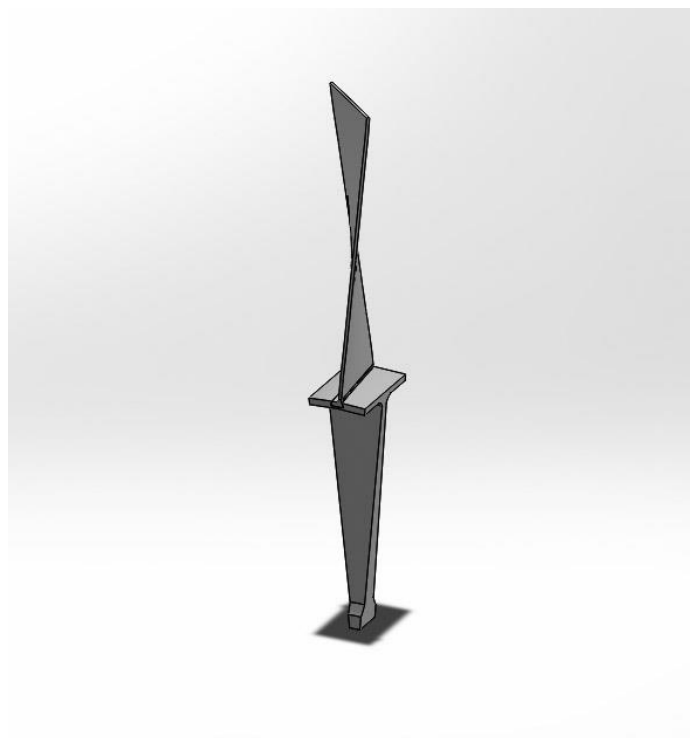


Рис.3 Сектор диска компрессора с лопаткой

Литература

1. Бураго Н.Г., Журавлев А.Б., Никитин И.С. Сверхмногоцикловое усталостное разрушение титановых дисков компрессора. Вестник ПНИПУ. Механика. - 2013. - №1. - С. 52-67.
2. Бураго Н.Г., Журавлев А.Б., Никитин И.С. Анализ напряженного состояния диска компрессора ГТД // Вестник ПГТУ. Механика. - 2011. - №1. - С. 46-54.
3. Bathias C., Paris P. C. Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice. Dekker - NY. 2005. 328p.

ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА В УЗЛАХ КАНАЛОВ НА ОСНОВЕ ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ В ИНТЕГРАЛЬНОЙ ФОРМЕ

Барсегян О.С.

МАИ (НИУ), каф. ФКМ

E-mail: different_ovik@mail.ru

Предлагаемый инженерный метод основан на анализе первого и второго начал термодинамики, применительно к рассматриваемым участкам каналов, приводит к качественному выводу о независимости термодинамической функции – коэффициента восстановления давления от геометрических воздействий (угла наклона бокового патрубка, скачок площади, излом оси канала).

Использование законов сохранения в интегральной форме подразумевает процедуру осреднения параметров состояния среды на характерных участках поверхности узла и возможность квазиодномерной трактовки течения на границах узла с внешними участками потоков. Подобная трактовка течения в узле, во всех рассмотренных в работе примерах, приводит к незамкнутой системе алгебраических уравнений и необходимости дополнения их гипотезами. Все известные, к настоящему времени, гипотезы – физически некорректны, так как неадекватны моделируемому явлению и, тем самым, нарушают сами законы сохранения и второе начало термодинамики порознь или совместно.

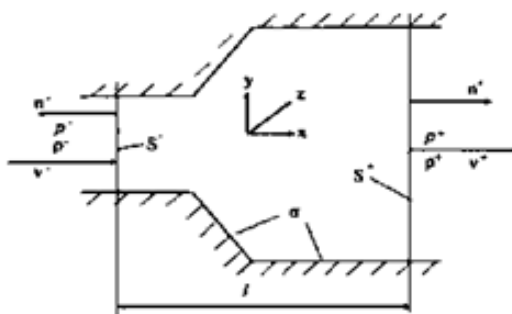


Рис.1. Скачок площади - сужение, расширение

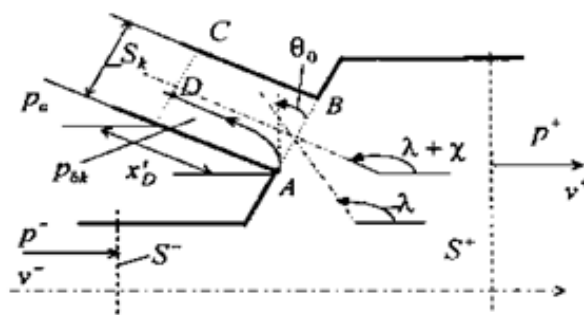


Рис. 2. Истечение; "короткий патрубок"

Предлагаемый инженерный метод основан на анализе первого и второго начал термодинамики, применительно к рассматриваемым участкам каналов, приводит к качественному выводу о независимости термодинамической функции – коэффициента восстановления давления σ от геометрических воздействий x_i (угла наклона бокового патрубка, скачок площади, излом оси канала, и т. п.). Подобную функцию можно построить

на основе законов сохранения в интегральной форме, содержащих такие воздействия. Безусловный приоритет выводам термодинамики

$$\partial\sigma/\partial x_i = 0,$$

что позволяет получить необходимое число дополнительных соотношений. Частные интегралы этих условий имеют вид нелинейных алгебраических уравнений, как и сами законы сохранения.

Метод возвращает свойство замкнутости системе уравнений гидрогазодинамики в интегральной форме, сохраняя преимущества традиционного подхода:

- удовлетворяет первому и второму началам термодинамики;
- не требует привлечения гипотез извне (дополнительные соотношения содержатся в самой комбинации законов сохранения; метод позволяет извлечь их в нужной форме);
- позволяет учесть, в качестве инструментов управления параметрами состояния на выходе из узла, различные воздействия на поток;
- метод применим для до- и сверхзвуковых течений газа;

Для учета, при необходимости, диссипативных потерь требует привлечения экспериментальных данных богатого арсенала прикладной гидрогазодинамики, а при их отсутствии – целевого эксперимента (физического и численного). В сопоставимых условиях совпадает с доступными экспериментальными данными или численными расчетами других авторов.

Литература

1. Дубравин Ю.А. О связи гидродинамических параметров в зонах локальных воздействий на поток// ПМТФ, 1989, N3, С.60-69
2. Дубравин Ю.А. Условия в узле одномерных течений газа // ПМТФ, 1995, N4, С.98-109
3. Дубравин Ю.А., Ландик Л.В. К вопросу об эффективной организации вдува массы в канал// Изв. ВУЗов Авиационная техника, 1997, N1. С.90-95
4. Беклемишев Н.Н., Дубравин Ю.А. Прикладная гидрогазодинамика внутренних течений. Специальные задачи// серия «Научная библиотека», М.: изд-во МАИ, 2016, 196с. (монография)
5. Дубравин Ю.А. Математическое моделирование течений жидкости и газа в каналах с локальными конечными по величине воздействиями на поток. Диссерт. на степень д.т.н. (спец. 01.02.05.). Пермь: ИМСС УрО РАН. 1998. 270 с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛИЗИСТОЙ ОБОЛОЧКИ ВЕРХНЕЙ ЧЕЛЮСТИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ПРОТЕЗОМ

Баршай А.М., Набережнев П.А.

Научный руководитель — Ph.D. Никитин А.Д.

МАИ, Москва

E-mail: cemetcki@yandex.ru

Современные тенденции в области протезирования и формирования имплантат различной степени сложности показывают постоянно растущий интерес к персонализации искусственных элементов. Так, например, при протезировании элементов полости рта (зубы, зубные протезы) все чаще возникает необходимость предварительного создания математической модели с учетом индивидуальных особенностей строения полости рта пациента. Рассматривается задача о контакте полного зубного протеза верхней челюсти с живыми тканями полости рта. При этом предполагается, что основную нагрузку при пережевывании пищи последовательно воспринимают различные зубные пары, по мере продвижения пищевого комка от резцов к молярам. Со стороны костной ткани уравнивающие силы возникают в первую очередь вследствие контакта полного зубного контакта с торусом. Кроме того, протез в значительной степени опирается на слизистую оболочку полости рта, имеющую неравномерную податливость. В клинической практике большое значение имеет податливость слизистой оболочки, обусловленная толщиной и гистологическим строением. Под податливостью подразумевают её свойство сжиматься под давлением и восстанавливать свою первоначальную форму после снятия нагрузки. Таким образом, податливость слизистой оболочки является функцией приложенного напряжения. С биологической точки зрения это обусловлено "вытеснением" крови из сосудов в области контакта с протезом. В следствии чего, податливость слизистой уменьшается. Анатомические и гистологические особенности строения слизистой оболочки, покрывающей альвеолярные отростки челюстей, твёрдое и мягкое нёбо и другие участки полости рта, имеют определённое значение в выборе метода протезирования больного, а также в его успехе. По своему положению слизистая оболочка относится к тканям пограничной среды, поэтому она устойчива к действию различных раздражителей механического характера, которым она подвергается в повседневной жизни. Сама задача о распределении напряжений в базисе протеза близка к задаче об изгибе балки на упругом основании. Таким образом важной задачей является построение адекватной математической модели слизистой оболочки, податливость которой может изменяться как функций от приложенных напряжений.

В настоящей работе используются методы 3D проектирования и моделирования, совмещенные с аналитическим модулем, задающим свойства упругого основания от величины контактных напряжений. Проводится математическое моделирование базиса верхнего протеза с целью определения напряженно-деформированного состояния (НДС) для случая жесткого закрепления по всей поверхности базиса и свободного опирания. Определяются поля напряжений и вертикальных перемещений, соответствующих двум рассматриваемым постановкам. После чего строится аналитическая модель поведения упругого основания с использованием полученных "опорных" значений. Рассматриваются линейные и нелинейные модели поведения упругого основания и оценивается влияние его параметров на НДС базиса. Подобного рода модели позволяют оптимизировать процесс создания имплантата и обеспечить максимально комфортное и долгосрочное ношение таких протезов. Анализ и учет полей напряжений, возникающих в зубных протезах, позволяет во время эксплуатации значительно повысить комфорт и надежность изделия. Так, например, равномерное распределение полей напряжений в области контакта протеза с тканями полости рта позволяет замедлить естественный процесс "проседания" костной ткани в областях с высокой напряженностью. Несмотря на высокую значимость подобных расчетов, в настоящее время они сталкиваются со значительными сложностями в определении механических свойств живых тканей и отсутствием современных моделей для них.

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ПЛОСКОСТИ В УСЛОВИЯХ МНОГОЦИКЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ СДВИГОМ ФАЗ

Башкатова М.Ш.

Научный руководитель: д.ф.-м.н. Никитин И.С.

МАИ

E-mail: mimilena@yandex.ru

Режимы циклического нагружения, возникающие при эксплуатации различных технических устройств и конструкций, как правило, не удаётся воспроизвести в лабораторных условиях в виду того, что реальные условия эксплуатации выходят за рамки таких случаев как простое растяжение, изгиб или кручение. Реальное нагружение практически всегда на деле носит сложный, многоосный циклический характер. Инженеру в процессе проектирования любого элемента, испытывающего существенное циклическое нагружение необходимо знать значение некоторой физической величины, превышение которой будет означать непригодность дизайна или материала конструкции, поэтому для оценки их долговечности применяются многоосные критерии усталостного разрушения, учитывающие в том числе и сдвиг фаз циклического нагружения, которые как показано имеет принципиальное влияние на ориентацию критической плоскости. В настоящее время принято проектировать конструкции, таким образом, чтобы прикладываемые нагрузки вызывали напряжения много меньше предела усталости материала, поэтому количество потенциальных систем скольжения мало и исчисляется единицами. В процессе нагружения какая-то определённая плоскость скольжения становится доминантной, т.е. «критической», поскольку на ней происходят процессы зарождения и развития усталостной трещины.

Некоторые современные критерии многоосного усталостного разрушения [1–3] учитывают ориентацию критической плоскости. Обычно, сложные режимы многоосного циклического нагружения со сдвигом фаз плохо поддаются или вовсе не решаются аналитически, поэтому определение ориентации критической плоскости и, следовательно, долговечности, проводится численно. В данной работе, основываясь на хорошо апробированном критерии [2], предлагается алгоритм аналитического определения ориентации критической плоскости в условиях многоосного циклического нагружения с произвольным сдвигом фаз для классических областей усталости – малоциклового и многоциклового.

В данной работе приводится алгоритм построения аналитического решения задачи о многоосном нагружении с произвольным сдвигом фаз. В работе [4] показано, что неизвестные параметры критерия могут быть получены из серии одноосных испытаний на усталость с различными коэффициентами асимметрии цикла. Проведена оценка количества циклов до разрушения материала по рассматриваемому критерию в зависимости от сдвига фаз. Показано значительное влияние сдвига фаз на усталостную долговечность материала.

Литература

1. Findley W. A theory for the effect of mean stress on fatigue of metals under combined torsion and axial load or bending// J. of Eng. for Indust. – 1959. – Pp. 301–306.
2. Papadopoulos I. V. Long life fatigue under multiaxial loading// International Journal of Fatigue. – 2001. – Vol. 23. – Pp. 839-849.
3. Carpinteri A., Spagnoli A., Vantadori S. Multiaxial assessment using a simplified critical plane-based criterion. // Int. J. of Fatigue. – 2011. – V. 33. – Pp. 969–976.
4. Бурого Н.Г., Журавлёв А.Б., Никитин И.С. Модели многоосного усталостного разрушения и оценка долговечности элементов конструкции // МТТ – 2011. – №6. – С. 22 – 33.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ

Баяндин С.Р.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Институт механики сплошных сред УрО РАН
E-mail: krd2874@mail.ru

Проведено численное моделирование процесса роста усталостной трещины внутри объема материала после ее образования. Рассмотрены варианты с различными амплитудами нагружения. Построена зависимость скорости роста трещины от амплитуды приложенных деформаций.

Механические компоненты машин подвержены циклическому нагружению в процессе эксплуатации. При приложенных напряжениях намного ниже, чем предел статической прочности материала, он может разрушиться после некоторого числа циклов. Это явление называют усталостью материалов. Экспериментальному [1-4] и теоретическому [4-8] исследованию усталостного разрушения металлов и сплавов посвящен ряд работ. Выделяют мало- (10^1 - 10^4 циклов), много- (10^4 - 10^7 циклов) и гигацикловую (10^8 - 10^{10} циклов) усталость. В третьем случае трещина образуется внутри материала (под поверхностью). Поэтому данный тип разрушения является наиболее опасным. Ему и посвящено настоящее исследование.

Решение краевой задачи для реальной конструкции требует огромных вычислительных ресурсов и возможно лишь для мало- и многоциклового усталости [6-8]. Поэтому рассматривается ситуация поведения небольшого объема материала после образования в нем трещины под поверхностью. В осесимметричной постановке решается задача циклического нагружения цилиндрического объема материала высотой и диаметром 1 мм со сферической трещиной в центре, диаметром 0,1 мм.

В качестве исследуемого материала был выбран алюминиевый сплав АМг6, как перспективный материал авиадвигателестроения, который интенсивно изучается при циклических [1, 4], динамических [9-13] и ударно-волновых [14] воздействиях. Для описания поведения сплава АМг6 использовалась упруго-пластическая модель [4], состоящая из следующих уравнений:

$$\begin{aligned} \rho \dot{\mathbf{v}} &= \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}, \quad \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{v} + \mathbf{v} \nabla), \quad \boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}_s + \boldsymbol{\sigma}_d, \quad \boldsymbol{\sigma}_s = \frac{1}{3}(\boldsymbol{\sigma} : \mathbf{E})\mathbf{E}, \\ \boldsymbol{\varepsilon} &= \boldsymbol{\varepsilon}^e + \boldsymbol{\varepsilon}^p, \quad \boldsymbol{\sigma} = \frac{1}{3}\lambda(\boldsymbol{\varepsilon}^e : \mathbf{E})\mathbf{E} + 2G\boldsymbol{\varepsilon}^e, \quad \boldsymbol{\varepsilon}^p = \frac{3}{2} \frac{\sqrt{\boldsymbol{\varepsilon}^p : \boldsymbol{\varepsilon}^p}}{\sqrt{\boldsymbol{\sigma}_d : \boldsymbol{\sigma}_d}} \boldsymbol{\sigma}_d, \\ \sqrt{\frac{3}{2}\boldsymbol{\sigma}_d : \boldsymbol{\sigma}_d} &= \sigma_T, \quad \rho c \dot{T} = \beta \boldsymbol{\sigma} : \boldsymbol{\varepsilon}^p + \alpha \Delta T, \quad \varepsilon_{eq}^p \geq \varepsilon_f \left(1 + d \frac{T - T_t}{T_m - T_t} \right) \end{aligned}$$

Приняты обозначения: ρ – плотность, \mathbf{v} – вектор скорости, $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напряжений, $\boldsymbol{\sigma}_s$ и $\boldsymbol{\sigma}_d$ – его шаровая и девиаторная части, $\boldsymbol{\varepsilon}$ – тензор малых деформаций, $\boldsymbol{\varepsilon}^e$ и $\boldsymbol{\varepsilon}^p$ – его упругая и пластическая составляющие, \mathbf{E} – единичный тензор, λ и G – упругие константы, σ_T – предел текучести, c – удельная теплоемкость, T – температура, α – коэффициент теплопроводности, $\Delta(\cdot)$ – оператор Лапласа, $\nabla(\cdot)$ – оператор градиента в текущей конфигурации, β – коэффициент Тейлора-Квини; $\boldsymbol{\varepsilon}_{eq}^p$ – накопленная пластическая деформация. Задача решалась численно методом конечных элементов. Для расчета использовались следующие значения констант материала АМг6, взятые из работ [4, 9, 12-14]: $\sigma_T = 165$ МПа, $\sigma_B = 350$ МПа, модуль Юнга $E = 71$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, $\rho = 2640$ кг/м³, $\varepsilon_f = 0,2$, $d = 4,2$, $T_t = 25$ °С, $T_m = 660$ °С, $c = 922$ Дж/К, $\beta = 0,9$, $\alpha = 0$ (в работе [9] показано, что для скоростей деформации 300 с⁻¹ и выше теплопроводностью для сплава АМг6 можно

пренебречь). Результаты расчетов приведены на рис.1-2.

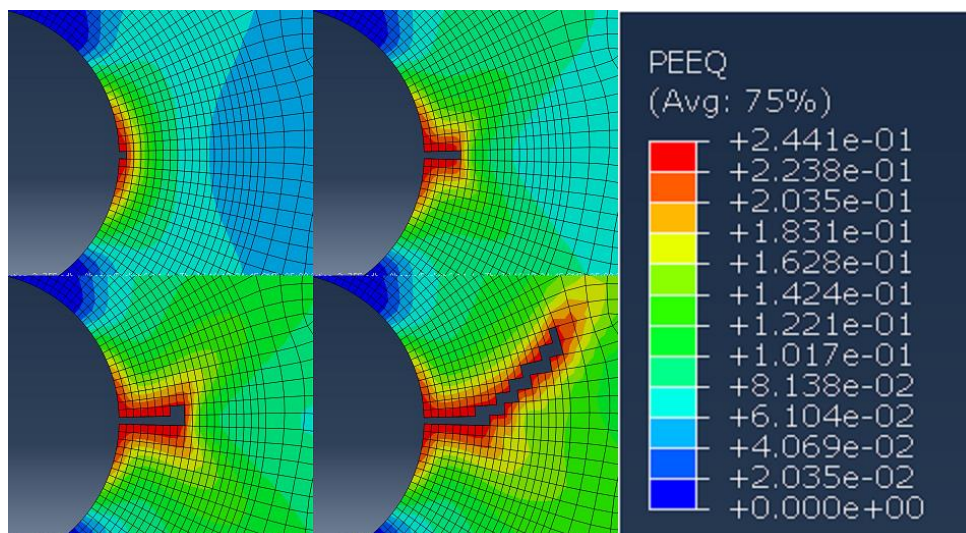


Рис. 1. Эволюция роста трещины, начиная с момента образования для амплитуды приложенных деформаций 0,275 %

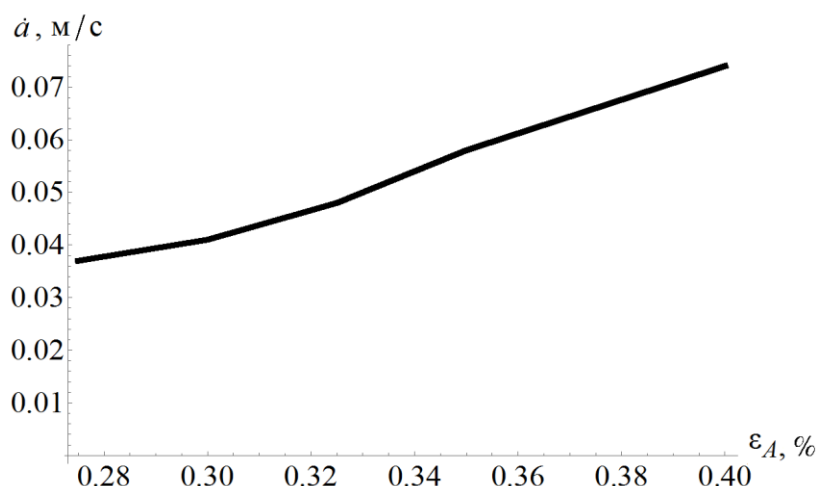


Рис. 2. Зависимость скорости роста усталостной трещины (\dot{a}) от амплитуды приложенной деформации (ϵ_A)

Проведена серия вычислительных экспериментов с различными амплитудами приложенных перемещений от $2 \cdot 10^{-6}$ м до $4 \cdot 10^{-6}$ м. Во всех случаях материал был подвержен ста циклам нагружения. После образования трещины под поверхностью при исследуемых амплитудах приложенной деформации материал АМг6 не способен выдержать более 100 циклов нагружения, что свидетельствует о необходимости замены детали конструкции, в которой образовалась трещина размером 100 мкм и более.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 18-72-00142.

Литература

1. Оборин В.А., Банников М.В., Баяндин Ю.В., Соковиков М.А., Билалов Д.А., Наймарк О.Б. Фрактальный анализ поверхности разрушения сплава АМг6 при усталостном и динамическом нагружении // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2015. – № 2. – С. 116–126.
2. Оборин В.А., Банников М.В., Наймарк О.Б. Длиннокорреляционные многомасштабные взаимодействия в ансамблях дефектов и оценка надежности алюминиевых сплавов при

- последовательных динамических и усталостных нагружениях // Письма в Журнал технической физики. – 2011. – Т. 37, № 5. – С. 105-110.
3. Наймарк О.Б., Банников М.В. Нелинейная кинетика развития поврежденности и аномалии упругих свойств металлов при гигацикловом нагружении // Письма о материалах. – 2015. – Т. 5, № 4 (20). – С. 497-503.
 4. Оборин В.А., Баяндин Ю.В., Билалов Д.А., Соковиков М.А., Чудинов В.В., Наймарк О.Б. Автомодельные закономерности развития поврежденности и оценка надежности сплавов АМг6 и Д16Т при комбинированном динамическом и гигацикловом нагружении // Физическая мезомеханика. – 2018. – Т. 21, № 6. – С. 135-145.
 5. Билалов Д.А., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. Математическое моделирование процесса разрушения сплава АМг2.5 в режиме много- и гигацикловой усталости // Вычислительная механика сплошных сред. – 2018. – Т. 11, № 3. – С. 323-334.
 6. Волков И.А., Коротких Ю.Г., Панов В.А., Шишулин Д.Н. Моделирование процессов накопления усталостных повреждений в конструкционных сталях при блочном малоцикловом нагружении // Вычислительная механика сплошных сред. – 2014. – Т. – 7, № 1. – С. 15-22.
 7. Волков И.А., Игумнов Л.А., Тарасов И.С. Оценка усталостной долговечности материалов и конструкций при малоцикловом нагружении // Вычислительная механика сплошных сред. – 2017. – Т. 10, № 1. – С. 17-30.
 8. Гучинский Р.В., Петин С.В. Численное моделирование распространения полуэллиптической трещины усталости на основании оценки накопления повреждений // Вычислительная механика сплошных сред. – 2015. – Т. 8, № 4. – С. 376-385.
 9. Билалов Д.А., Соковиков М.А., Чудинов В.В., Оборин В.А., Баяндин Ю.В., Терехина А.И., Наймарк О.Б. Численное моделирование и экспериментальное исследование локализации пластической деформации при динамическом нагружении образцов в условиях близких к чистому сдвигу // Вычислительная механика сплошных сред. – 2017. – Т. 10, № 1. – С. 103-112.
 10. Билалов Д.А., Соковиков М.А., Чудинов В.В. Многомасштабные механизмы локализации пластической деформации при пробивании преград // Деформация и разрушение материалов. – 2017. – № 5. – С. 43-47.
 11. Froustey С., Наймарк О.Б., Пантелеев И.А., Билалов Д.А., Петрова А.Н., Ляпунова Е.А. Многомасштабные механизмы структурной релаксации и разрушения в условиях адиабатического сдвига // Физическая мезомеханика. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 33-44.
 12. Билалов Д.А., Соковиков М.А., Чудинов В.В., Оборин В.А., Баяндин Ю.В., Терехина А.И., Наймарк О.Б. Исследование локализации пластического сдвига в алюминиевых сплавах при динамическом нагружении // Вычислительная механика сплошных сред. – 2015. – Т. 8, № 3. – С. 319-328.
 13. Глушак Б.Л., Игнатова О.Н., Пушков В.А., Новиков С.А., Гирин А.С., Сеницын В.А. Динамическое деформирование алюминиевого сплава АМг-6 при нормальной и повышенной температурах // Прикладная механика и техническая физика. – 2000. – Т. 41, № 6. – С. 139-143.
 14. Глушак Б.Л., Игнатова О.Н., Надёжин С.С., Раевский В.А. Релаксационная модель сдвиговой прочности пяти металлов (алюминий, бериллий, медь, тантал, уран) // ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов. – 2012. – № 2. – С. 25-36.

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ДЕФОРМАЦИИ В СВАРНОМ ШВЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT1-0 ПРИ ДЕФОРМАЦИИ РАСТЯЖЕНИЕМ. МЕТОД КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Курган К.А.¹, Безухов К.А.

Научный руководитель – профессор, д.ф.-м.н. Клопотов А.А.^{1,2}

E-mail: klopotovaa@tsuab.ru

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск.

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск.

Соединения в конструкциях титановых сплавов при помощи сварки используется достаточно широко в авиационной и космической отраслях. В процессе сварки происходит нагрев сплава в области сварного шва до температур плавления сплава. Такое термическое воздействие приводит к изменению структурно-фазового состояния и механических свойств в сплаве как в зоне сварного шва, так и в области термического влияния [1,2]. В настоящее время для изучения влияния приложенного механического напряжения на материалы применяют экспериментальные методы, использующие трехмерную цифровую оптическую систему Vic-3D [3]. Применительно к сварочным процессам, с практической точки зрения, важной является информация о влиянии внешнего приложенного напряжения на распределение деформационных полей в зоне сварного шва.

Целью данной работы является выполнение исследований на мезо- и макромасштабном уровнях эволюции деформационных полей на поверхности в области сварного шва в титановом сплаве VT1-0 при растяжении методом корреляции цифровых изображений.

Образцы из титанового сплава VT1-0 имели размеры 80×9×1,8 мм. В исходном состоянии образцы из сплава VT1-0 обладали микрокристаллической структурой со средним размером зерна порядка 5 мкм.

Электронно-лучевую сварку двух титановых пластин VT1-0 проводили на промышленной установке ЭЛС-0,5-6 с вакуумной камерой. Максимальная мощность электронно-лучевого пучка составляла 6 кВт с диаметром в зоне сварки ~ 0,5 мм.

Для получения данных при помощи цифровой оптической системы Vic-3D на поверхности образцов были созданы спекл-картины (стохастическое расположение черных точек на белом фоне).

Деформационные воздействия растяжением на образцы со сварными швами проводили на испытательной машине «INSTRON 3386». Эволюцию деформационных полей при испытаниях фиксировали при помощи оптической измерительной системы VIC-3D [3].

Поля перемещений, регистрируемые оптической измерительной системой VIC-3D, отражают проекции смещений локальных участков поверхности вдоль оси OX – «поперечная деформация» образцов; вдоль оси OY – «продольная деформация» образцов. Ось OX направлена перпендикулярно относительно оси приложенного внешнего напряжения σ при растяжении образца. Ось OY – вдоль направления напряжения σ .

Были представлены распределение зоны локальной деформации в области сварного шва при растяжении при небольших внешних напряжениях, и при значительных напряжениях. Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что определяющим является рост локализации деформации непосредственно в зоне сварного шва. На начальном этапе нагружения образца (при внешнем напряжении $\sigma = 35$ МПа) в области сварного шва шириной порядка 0,5 мм наблюдается локализация деформаций с более высокими значениями относительно средних значений деформаций на поверхности всего образца. Здесь необходимо отметить, что значение ширины области локализации в зоне сварного шва сопоставима со значением диаметра электронно-лучевого пучка, при помощи которого было проведено сварное соединение.

Дальнейший рост внешнего напряжения приводит к значительному росту локальной деформации в области сварного шва и достигает значений порядка 4% при внешнем напряжении $\sigma = 170$ МПа. При этом на поверхности всего образца вдали от сварного шва среднее значение деформации на порядок меньше.

Таким образом, результаты исследования, полученные при помощи оптической

измерительной системы VIC-3D, позволили выявить следующие особенности в распределении деформационных полей при растяжении образца со сварным швом. Установлено, что при растяжении происходит образование локализованной области пластической деформации в зоне сварного шва и значительный рост пластической деформации в этой зоне с увеличением приложенной внешней нагрузки. Это отражает ситуацию, что при таком виде сварки и при данных режимах сварки двух пластин титанового сплава BT1-0, прошедшие термомеханические процессы в условиях быстрого нагрева и охлаждения, приводят к уменьшению прочностных свойств сплава в области сварного шва.

Литература

1. С. М. Гуревич, В. Н. Замков, Я. Ю. Компан и др. *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов*. Киев: Наукова думка. 1979. – 300 с.
2. В.А. Клименов, С.Ф. Гнюсов, А.И. Потехаев, А.А. Клопотов, Ю.А. Абзаев, К.А. Курган и др. Структура и свойства микрокристаллического и субмикрокристаллического титанового сплава BT1-0 в области шва при электронно-лучевой сварке. *Известия ВУЗов. Физика*. 2017. Т.60, №6. С.62-70.
3. Д.Г. Копаница, А.М. Устинов, А.И. Потехаев, А.А. Клопотов, Е.С. Марченко. Изменения напряженно-деформированных состояний приповерхностных слоев стали в процессе нагружения. *Известия ВУЗов. Физика*. 2017. Т.60, №9. С.105-113.

ФИЗИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ СВАРКЕ ДАВЛЕНИЕМ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Бикмухаметова А.А.^{1,2}, Галиева Э.В.¹, Ахунова А.Х.¹,

Научный руководитель: д.т.н., Валитов В.А.¹

¹ ИПСМ РАН

² УГАТУ

E-mail: *bikmukhametova_aa@mail.ru

В работе методом компьютерного (конечно-элементного) и физического моделирования подробно рассмотрено влияние формы макрорельефа поверхности на напряженно-деформированное состояние (НДС) и формирование твердофазного соединения (ТФС) деформируемого никелевого сплава с литым интерметаллидным сплавом на основе Ni₃Al. Выявлено, что наличие макрорельефа на поверхности одного из соединяемых материалов способствует уменьшению площади застойной зоны и локализации деформации в зоне соединения, что благоприятно сказывается на качестве ТФС. Установлено, что оптимальной формой рельефа, обеспечивающей создание полного физического контакта является синусоидальная.

Введение. Наиболее перспективными методами изготовления неразъемных соединений из высокожаропрочных труднодеформируемых никелевых сплавов являются диффузионная сварка [1, 2], а также сварка давлением в условиях сверхпластичности, которая позволяет получать качественные ТФС и сохранять исходные свойства свариваемых металлов [3÷7]. Как известно [1], условно формирование ТФС можно разделить на 3 этапа: I. образование физического контакта; II. активация соединяемых поверхностей; III. объемное взаимодействие. Качество ТФС может снижаться в области так называемых «застойных зон», которые зачастую могут появляться при сварке давлением по схеме одноосного сжатия. Одним из способов уменьшить протяженность таких зон является создание рельефа на поверхности более прочного материала [1-3].

Целью настоящей работы являлось проведение сравнительного анализа результатов компьютерного и физического моделирования влияния рельефа поверхности, на формирование ТФС образцов жаропрочного никелевого сплава ХН58МБЮД с интерметаллидным сплавом на основе Ni₃Al.

Материалы и методы исследования. Проведено физическое и компьютерное (конечно-элементное) моделирование пластического течения материала при сварке давлением по схеме одноосного сжатия образцов из разнородных сплавов: деформируемого ХН58МБЮД и литого интерметаллидного ВКНА–моно в температурно-скоростных условиях сверхпластической деформации никелевого сплава с ультрамелкозернистой структурой (T=850 °C, начальная скорость деформации 10⁻⁴ с⁻¹). Было рассмотрено несколько вариантов соединения: 1) соединяемые поверхности плоские; 2) на соединяемую поверхность образца из сплава ВКНА-моно был нанесен макрорельеф: выступы треугольные, прямоугольные, форме трапеции и синусоиды, а сплав ХН58МБЮД имел плоскую поверхность соединения; 3) образцы из соединяемых сплавов имели взаимно комплементарным рельефом.

Компьютерное моделирование проводили в двумерной постановке (плоское деформированное состояние) с помощью пакета прикладных программ DEFORM-2D. Исследовались сварка давлением двух образцов с геометрическими размерами по осям X и Y 5x5 мм [1, 2, 4].

Физическое моделирование проводили на установке ИМАШ 20-78, деформационным соединением двух кубических образцов с геометрическими размерами 5x5x5 мм³.

Результаты и обсуждение. Рассмотрено напряженно-деформированное состояние материала при формировании твердофазного соединения сваркой давлением образцов с различной формой рельефа. В случае соединения, когда обе поверхности были плоские отмечено наличие застойных зон деформации, ухудшающих качество твердофазного соединения. Наличие рельефа позволяет перераспределить деформацию и локализовать ее в зоне ТФС (рис. 1, 2).

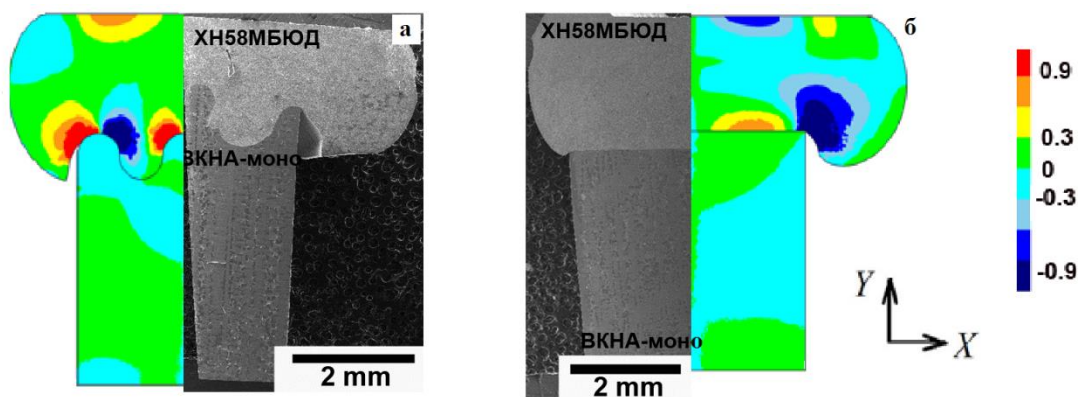


Рис. 1. Физическое и компьютерное моделирование сварных образцов рельефом на в форме синусоиды интерметаллидном сплаве (а) и с плоской поверхностью (б).

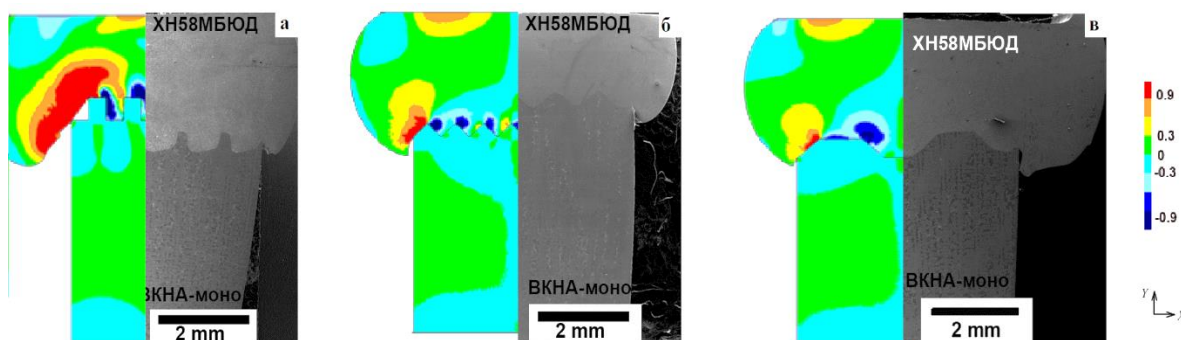


Рис. 2. Физическое и компьютерное моделирование сварных образцов с различной формой рельефа на поверхности интерметаллидного сплава.

Результаты компьютерного моделирования показали, что при сварке рельефной поверхности возникают области со значительной сдвиговой деформацией по всей зоне соединения, в отличие от образцов с плоскими и взаимно рельефными поверхностями, где в центре образцов хорошо видны застойные зоны деформации. При сварке образцов с рельефом в форме прямоугольных и треугольных выступов на углах появляются участки с большой кривизной поверхности, что значительно увеличивает время затекания материала в углы и приводит к большой степени деформации верхнего образца. Однако в случае сварки образцов с рельефом с треугольными выступами время сварки меньше, так как меньше участков с большой кривизной поверхности. Результаты компьютерного моделирования согласуются с экспериментальными данными. Установлено, что при сварке давлением вся деформация локализуется в никелевом сплаве ХН58МБЮД. Установлено, что наличие рельефа благоприятно влияет на локализацию деформации, что отражается в снижении величины относительной протяженности пор. Однако, для заполнения рельефа требуется больше времени и большая степень деформации. В образцах с рельефом поверхности на интерметаллидном сплаве в виде синусоиды создается полный физический контакт. В образцах с рельефной поверхностью, где присутствуют углы, происходит «сглаживание» углов, на наклонных участках обеспечивается полный физический контакт, а в острых и прямых углах полного затекания материала не происходит, что не может не отражаться на качестве соединения. Поэтому наиболее предпочтительным вариантом рельефа является синусоида, поскольку в этом случае отсутствуют участки, где соединения не произошло.

Был рассмотрен вариант, когда свариваемые поверхности соединяемых материалов имели взаимно комплементарный рельеф. В данном случае, сочетание таких рельефных поверхностей равносильно созданию большого трения – движение материала вдоль поверхности сварки уменьшается, что и приводит к значительному снижению сдвиговой компоненты деформации вблизи поверхностей касания [4, 7].

Выводы.

1. Методом компьютерного (конечно-элементного) и физического моделирования показано, что наличие макрорельефа на поверхности более прочного соединяемого материала способствует уменьшению площади застойной зоны и локализации деформации в зоне соединения, что оказывает благоприятное влияние на качество ТФС.
2. Установлено, что оптимальной формой рельефа, обеспечивающей создание полного физического контакта, является синусоидальная.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-19-00685). Экспериментальные исследования были выполнены на базе Центра коллективного пользования научным оборудованием ИПСМ РАН.

Литература

1. Каракозов Э.С. Сварка металлов давлением. - М.: Машиностроение, 1986. – 280 с.
2. А.В. Люшинский Диффузионная сварка разнородных материалов : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений - М. : Издательский центр «Академия», 2006. — 208 с.
3. Galieva, E.V. Effect of surface relief on solid phase joining of heat-resistant nickel superalloys / E.V. Galieva, R.YA. Lutfullin, A.KH. Akhunova, V.A. Valitov, S.V. Dmitriev / Science and technology of welding and joining. 2018. P. 1-7. <https://doi.org/10.1080/13621718.2018.1440992>
4. Ахунова А.Х., Галиева Э.В., Дроздов А.А., Аргинбаева Э.Г., Дмитриев С.В., Лутфуллин Р.Я. Роль сдвиговой компоненты деформации при сварке давлением образцов из разнородных литых и деформируемых сплавов на основе никеля // Письма о материалах 6(3) 2016, 210-215
5. Валитова Э.В., Влияние профиля поверхности на формирование твердофазного соединения при совместной деформации разнородных никелевых сплавов / Валитова Э.В., Мухаметрахимов М.Х., Лутфуллин Р.Я., Валитов В.А. // Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент. Материалы V международной научно-инновационной молодежной конференции. – Тамбов: Издательство ИП Чеснокова А.В., 2013. – С. 98 – 100.
6. Ахунова А.Х., Галиева Э.В., Валитов В.А. Математическое моделирование процесса сварки давлением образцов с различной формой рельефа свариваемых поверхностей. // Материалы IX Международной научно-инновационной молодежной конференции «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент» С. 273-275.
7. Ахунова, А.Х. Локализация деформации в зоне сварки давлением образцов с рельефом на свариваемых поверхностях / А.Х. Ахунова, С. В. Дмитриев, В.А. Валитов, Э.В. Валитова // Деформация и разрушение материалов. – 2014. – №11 – С. 13-17.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО МАТЕРИАЛА МАШИНОСТРОЕНИЯ АМГ2.5 ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ И ПОСЛЕДУЮЩЕМ УСТАЛОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ

Билалов Д.А.

Институт механики сплошных сред УрО РАН

E-mail: ledon@icmm.ru

Построена математическая модель для описания поведения металлов и сплавов при различных типах нагружения. Параметры модели идентифицированы на примере для сплава АМГ2.5. Численно получена кривая Вёлера (S-N диаграмма) в диапазоне 10^2 - 10^{10} циклов нагружения. Описан эффект дуальности кривой усталостного разрушения. Рассмотрен процесс предварительного динамического деформирования и последующих усталостных испытаний. Показано, что исследуемый материал слабо чувствителен к предварительному динамическому нагружению, что подтверждается экспериментами.

Проведено теоретическое исследование процесса усталостного разрушения сплава АМГ2.5 после предварительного динамического преднагружения. Статистическая теория дефектов [1-3] была использована для построения математической модели деформируемого твёрдого тела с мезоскопическими дефектами (микросдвиги и микротрещины), которая способна адекватно описать деформационное поведение пластичных материалов при различных типах нагружения. Численное изучение усталостного разрушения при количестве циклов 10^7 - 10^9 требует больших вычислительных мощностей, что делает решение краевой задачи затруднительным и возможным лишь при мало- и многоциклового усталости [4-6]. С целью экономии расчётного времени рассматривалось поведение представительного объёма материала. Математическая постановка задачи выглядит следующим образом:

$$\dot{p} = \dot{\varepsilon}_0^{n_p} (\Gamma_{p\sigma} \sigma(t) - \Gamma_p \frac{\partial F}{\partial p}), \quad (1)$$

$$\dot{\delta} = -\dot{p}_0^{n_\delta} \Gamma_\delta \frac{\partial F}{\partial \delta}, \quad (2)$$

$$\frac{F}{F_m} = \frac{p^2}{2} - \frac{p^2}{2\delta} + c_1 p + c_2 \ln(c_3 + c_4 p + p^2) - \frac{\sigma(t)p}{2G}, \quad (3)$$

$$\sigma(t) = \sigma_A \sin(2\pi \nu t), \quad (4)$$

$$p|_{t=0} = 0, \delta|_{t=0} = \delta_0, \quad (5)$$

где p – деформация, обусловленная дефектами; $\sigma(t)$ – напряжение; σ_A и ν – амплитуда и частота напряжений; δ – параметр структурного скейлинга; $\Gamma_{p\sigma}$, Γ_p , Γ_δ – положительные кинетические коэффициенты; $\dot{\varepsilon}_0 = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_c$, $\dot{p}_0 = \dot{p} / \dot{\varepsilon}_c$, $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации, $\dot{\varepsilon}_c = 1 \text{ c}^{-1}$; n_σ и n_δ – параметры, характеризующие скоростную чувствительность материала; G – модуль сдвига; c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , F_m – константы потенциала неравновесной свободной энергии F ; $\delta_0 = 1,15$. Неизвестные параметры модели идентифицировались в три этапа: 1 – определение кинетических коэффициентов с использованием диаграмм деформирования [7]; 2 – идентификация параметров, отвечающих за скоростную и температурную чувствительность с использованием экспериментальных данных о прочности материала при различных скоростях деформации [7] и температурах [8]; 3 – определение констант из уравнения для параметра структурного скейлинга (2) с использованием данных усталостных испытаний [7] при помощи экспериментальных данных по нагружению сплава АМГ2.5 при различных скоростях деформации [7]. Иллюстрация решения задачи минимизации невязки между экспериментальными и расчётными данными приведена на рис. 1а.

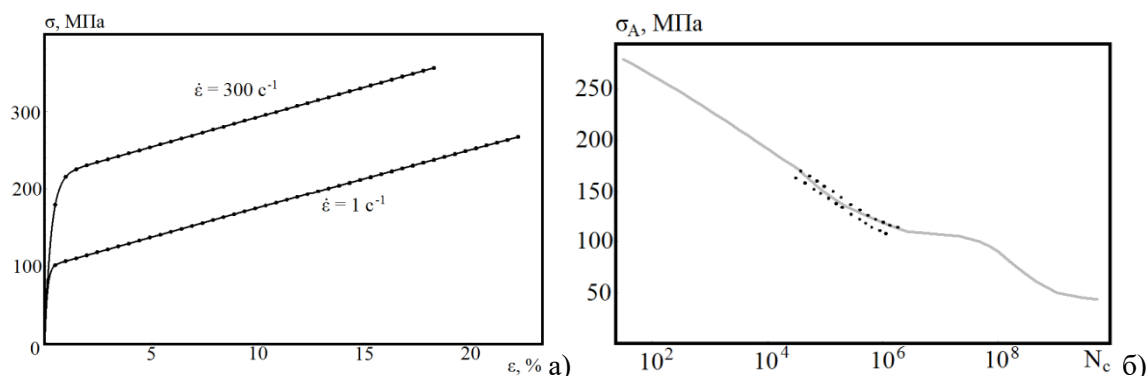


Рис. 1. Диаграммы деформирования при различных скоростях деформации: точки – эксперимент [7], сплошная линия – расчёт (а). S-N-диаграмма: сплошная линия – расчёт, точки – статистический разброс экспериментальных данных [7] (б)

Зависимость количества циклов до разрушения N_c от амплитуды приложенных напряжений изображена на рис. 1б. Теоретическая S-N диаграмма удовлетворительно соответствует эксперименту [7]. Эффект дуальности кривой Вёлера, который заключается в изменении угла наклона S-N диаграммы в логарифмических координатах при переходе от много- к гигацикловой усталости, представлен на рис. 1б. Уровень напряжений, при которых изменяется вид S-N кривой, соответствует пределу пропорциональности, когда связь напряжений и деформаций становится линейной.

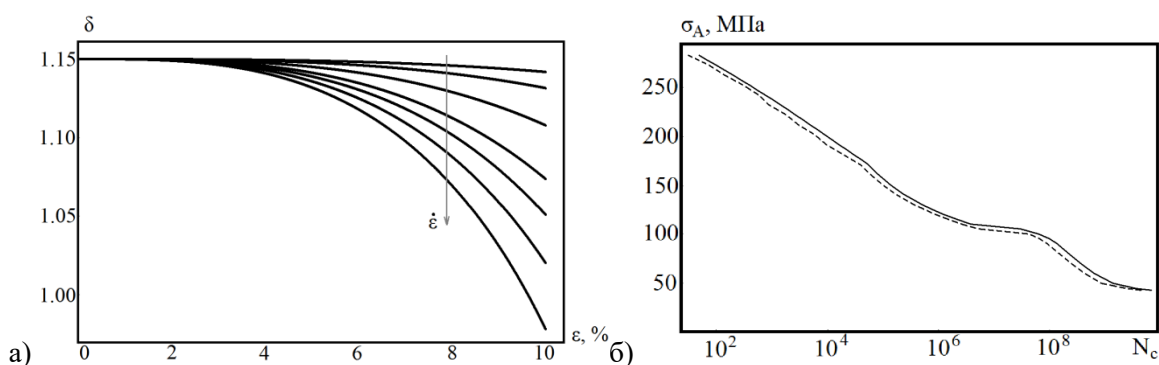


Рис. 2. Расчётная кривая Вёлера до (сплошная линия) и после предварительного динамического нагружения (пунктир)

Рассмотрен вариант предварительного динамического нагружения с последующим испытанием материала на усталостную прочность. Такое комбинированное воздействие находит различные приложения в авиадвигателестроении. Например, попадание камешков или птицы в лопатки двигателя при взлёте. Также примером может служить случайный удар (техник уронил гаечный ключ) по какому-либо элементу конструкции, после чего они отправляются в эксплуатацию. Смена состояния материала после динамического пластического деформирования учитывалось посредством δ (задано иное значения δ_0). Для того, чтобы определить значение δ_0 в зависимости от скорости и величины предварительной деформации, решалась задача динамического нагружения. Соответствующая зависимость параметра δ изображена на рис. 2б. Сравнение S-N кривых при $\delta_0 = 1,15$ и $\delta_0 = 1,05$ можно видеть на рис. 2а. Расчёт показал, что сплав АМг2.5 слабо чувствителен к предварительному динамическому нагружению, что подтверждено экспериментом [7].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 18-08-01186 а, 17-41-590149 р_а, 17-08-00905 а).

Литература

1. Билалов Д.А., Соковиков М.А., Чудинов В.В., Оборин В.А., Баяндин Ю.В., Терёхина А.И., Наймарк О.Б. Исследование локализации пластического сдвига в алюминиевых сплавах при динамическом нагружении // Вычислительная механика сплошных сред. – 2015. – Т. 8, №3. – С. 319-328.

2. Билалов Д.А., Соковиков М.А., Чудинов В.В., Оборин В.А., Баяндин Ю.В., Терёхина А.И., Наймарк О.Б. Численное моделирование и экспериментальное исследование локализации пластической деформации при динамическом нагружении образцов в условиях близких к чистому сдвигу // Вычислительная механика сплошных сред. – 2017. – Т. 10, № 1. – С. 103-112.
3. Билалов Д.А., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. Математическое моделирование процесса разрушения сплава АМг2.5 в режиме много- и гигацикловой усталости // Вычислительная механика сплошных сред. – 2018. – Т. 11, № 3. – С. 323-334.
4. Волков И.А., Коротких Ю.Г., Панов В.А., Шишулин Д.Н. Моделирование процессов накопления усталостных повреждений в конструкционных сталях при блочном малоцикловом нагружении // Вычислительная механика сплошных сред. – 2014. – Т. – 7, № 1. – С. 15-22.
5. Волков И.А., Игумнов Л.А., Тарасов И.С. Оценка усталостной долговечности материалов и конструкций при малоцикловом нагружении // Вычислительная механика сплошных сред. – 2017. – Т. 10, № 1. – С. 17-30.
6. Гучинский Р.В., Петин С.В. Численное моделирование распространения полуэллиптической трещины усталости на основании оценки накопления повреждений // Вычислительная механика сплошных сред. – 2015. – Т. 8, № 4. – С. 376-385.
7. Froustey C., Lataillade J.L. Influence of the microstructure of aluminium alloys on their residual impact properties after a fatigue loading program // Materials Science and Engineering A. – 2009. – Vol. 500. – P. 155-163.
8. Фролов К.В. Машиностроение. Энциклопедия. Том II-3: Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы. – М.: Машиностроение, 2001. – 880 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ ОБРАЗЦОВ 3D-ПЕЧАТИ

Буруруев А.М.

Научный руководитель – профессор, д.ф.-м.н. Попов А.Л.

ИПМех РАН

E-mail: alexey@bururuev.ru

Преимущество изготовления деталей методом 3D печати состоит в высокой точности реализации проектных размеров деталей при почти безотходном использовании материала. Однако в изготовленных данным способом изделиях, особенно с нависающими краями, пустотами, тонкостенными элементами, могут проявляться такие процессы как ползучесть и релаксация напряжений, которые способны привести к отклонениям от проектных размеров. В данной работе рассматривается искусственно вызванная релаксация напряжений и связанная с ней ползучесть в образце в форме параллелепипеда, созданном методом послойной фотополимеризации, сжатом по двум противоположным граням. Приводится описание экспериментальной установки, методики измерений, кривая релаксации напряжений и ее аппроксимация, а также наблюдаемая с помощью спекл-интерферометра ползучесть свободных от нагрузки граней образца в процессе релаксации.

В настоящей работе рассматриваются некоторые механические характеристики деталей из фотополимерных материалов, изготовленных послойно методом трехмерной печати с помощью 3D принтера DLP-типа (Digital Light Processing — цифровая обработка светом). Из фотополимера AB 710 В были напечатаны образцы в форме параллелепипедов с размерами 20×20×40 мм и кубиков с длиной грани 20 мм. Послойная печать производилась с постоянной толщиной слоя 0,1 мм и пятнадцатисекундной засветкой каждого слоя. После снятия образцов с подложки выполнялась их дополимеризация путем засвечивания ртутной лампой до стадии ликвидации липкости образцов. Получаемый в результате процесса полимеризации материал обладает свойствами упругости и ползучести [1-3].

Для создания исходного напряженного состояния и получения кривой релаксации была собрана измерительная установка (рис. 1), состоящая из тисков 2, в которых зажимался образец 1 и S-образный датчик силы 3; данные с датчика поступали на силоизмерительный преобразователь ТЕНЗО-М, обозначенный цифрой 4, и далее обрабатывались в ЭВМ.

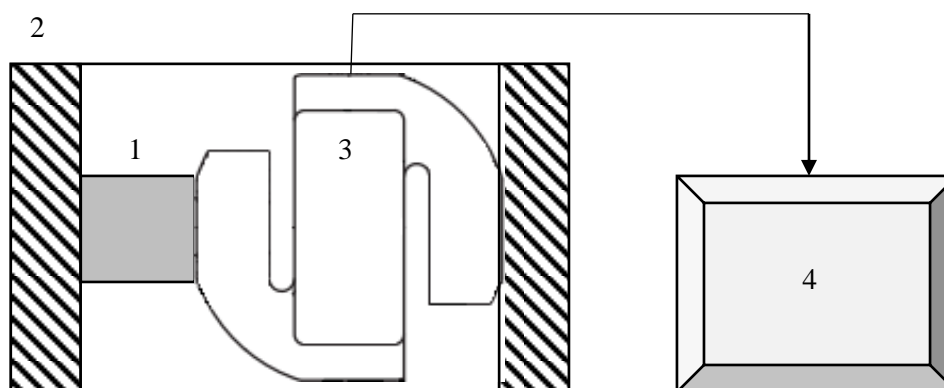


Рис. 1. Схема установки для определения кривой релаксации: 1 – фотополимерный образец, 2 – тиски, 3 – S-образный тензодатчик, 4 – силоизмерительный преобразователь.

Оценка необходимого уровня нагружения образца, при котором приложенные нагрузки не приводили бы к появлению пластических деформаций, делалась на основании диаграммы сжатия идентичного образца, получаемой с помощью прессы ДТС-06-100. Непосредственное выполнение экспериментов проводилось с исходной сжимающей силой 7000 Н, что соответствовало среднему значению зоны упругости на диаграмме. На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости напряжения от времени $\sigma(t)$ на начальном этапе 10 минут (рис. 2а) и на продолжительном интервале времени – 5 часов (рис. 2б).

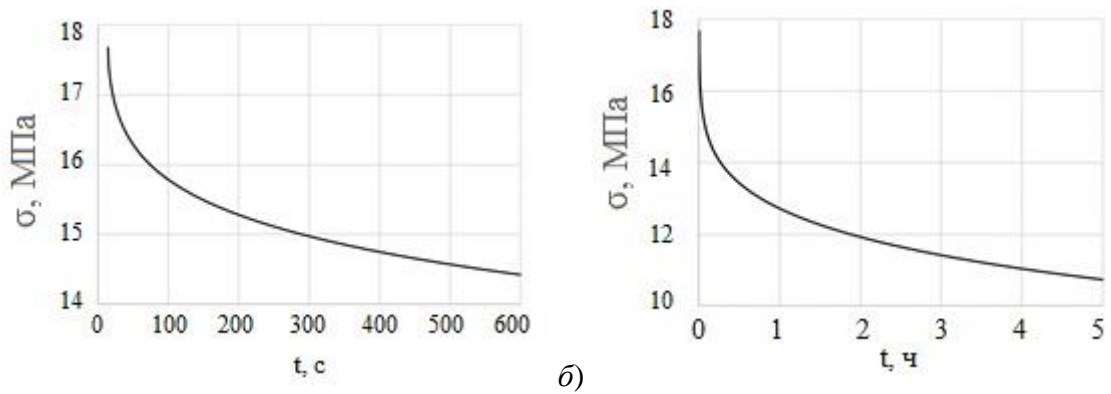


Рис. 2. Кривая релаксации напряжения в фотополимерном образце: *а)* на начальном этапе (0-10 мин); *б)* на длительном промежутке (0 – 5 ч).

Полученная кривая похожа на известные зависимости для полимерных образцов [4] и может быть аппроксимирована по методике [5] в виде суммы экспонент с привлечением четырех характерных времен релаксации:

$$\sigma(t) = \sum_{k=1}^4 \sigma_k(t), \quad \sigma_k(t) = a_k \exp\left(-\frac{t}{\tau_k}\right), k = 1, \dots, 4, \quad (1)$$

где a_k, τ_k – аппроксимирующие постоянные; t – время.

Постоянные a_k, τ_k подбирают так, чтобы каждое из слагаемых суммы (1) корректно аппроксимировало соответствующий участок релаксации экспериментальной кривой. Результаты такого подбора приведены на рис. 3.

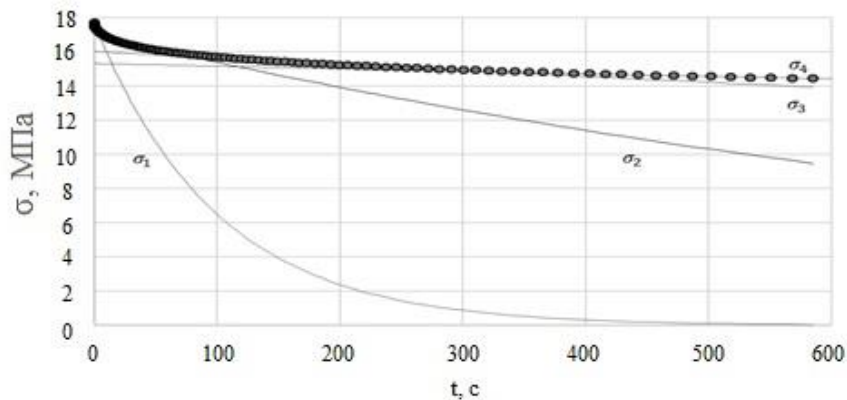


Рис. 3. Аппроксимации $\sigma_k(t)$ кривой релаксации, приведенной на рис. 2а.

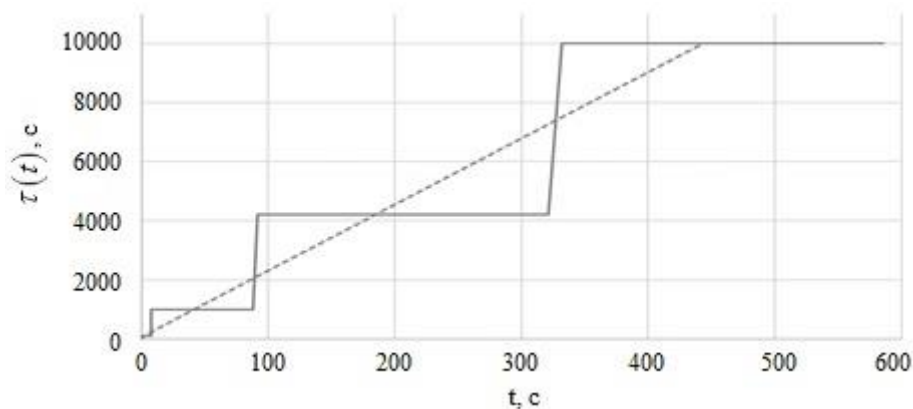


Рис. 4. Аппроксимации ступенчатыми функциями четырех времён релаксации на характерных участках экспериментальной кривой релаксации; центральные точки участков с одинаковыми значениями времён релаксации соединены штриховой линией.

Вычисленные значения τ_k характерных времен релаксации можно представить в виде ступенчатой функции $\tau(t)$ (рис. 4):

$$\tau(t) = \sum_{k=1}^4 \tau_k [H(t-t_{k-1}) - H(t-t_k)], \quad t_0 = 0, t_4 = T,$$

где $H(t)$ – функция Хевисайда; T – полное время релаксации для кривой, изображенной на рис. 3а; t_k – моменты времени, определяющие интервалы, в которых функции $\sigma_k(t)$ наиболее близки к аппроксимируемой $\sigma(t)$. Следует отметить близкий к линейному закон изменения среднего (по участкам) времени релаксации (см. рис. 4).

Из этого следует, что наборы времён релаксации, выражающиеся ступенчатыми функциями, могут быть представлены линейными зависимостями. Это даёт возможность адаптивной аппроксимации в виде:

$$\sigma(t) = \sigma_0(t_0) \exp\left(-\frac{t-t_0}{a(t-t_0)+b}\right), \quad (2)$$

где $\sigma_0(t_0)$ – напряжение в момент t_0 начала релаксации.

Функция (2) содержит всего два аппроксимирующих параметра a , b . В качестве иллюстрации на рис.5 представлена такая аппроксимация сплошной тонкой линией.

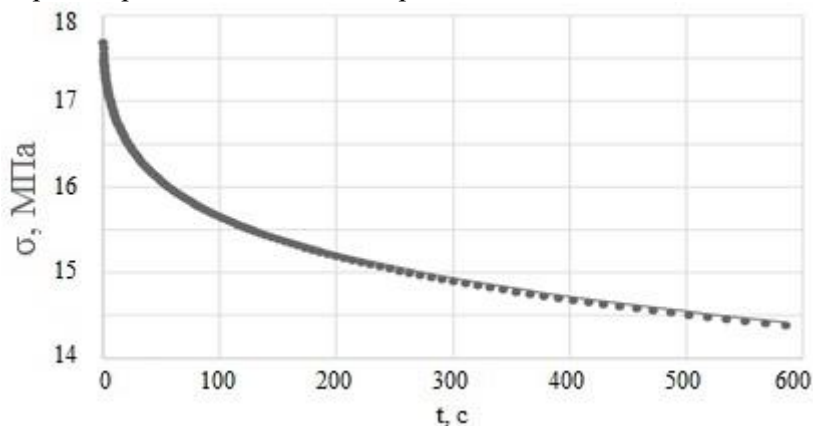


Рис. 5. Кривая релаксации и ее адаптивная аппроксимация.

Таким образом, предложенная адаптивная аппроксимация обеспечивает достаточную степень приближения к экспериментально полученной кривой релаксации напряжения в фотополимерном образце.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 17-19-01257.

Литература:

1. Manzhirov A. V. Advances in the theory of surface growth with applications to additive manufacturing technologies // *Procedia Engineering* – 2017. – no. 173. – P. 11–16.
2. Popov A.L. Application of the probe hole method for diagnostics of shrinkage stresses in products of additive technologies / Popov A.L. [and etc.] // *IUTAM Symposium on Mechanical design and analysis for AM technologies. Symposium materials (Moscow, Russia, August 20-25, 2018)* – Moscow: IPMech RAS, 2018. – P. 66-68.
3. P.S. Bychkov, V.M. Kozintsev, A.V. Manzhirov and A.L. Popov. Determination of Residual Stresses in Products in Additive Production by the Layer-by-Layer Photopolymerization Method// *Mech. Solids*. 52 (5), 524-529 (2017).
4. Работнов Ю.Н., Милейко С.Т. Кратковременная ползучесть. М.:Наука, 1970. 224 с.
5. Гольдштейн Р.В., Попов А.Л., Ченцов А.В. Аппроксимация и прогнозирование релаксационных кривых при испытаниях тонких полимерных волокон // *Препринты ФГБУН ИПМех РАН*, 2015. № 1112. 20 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГОМОГЕННЫХ ПОЛИМЕРОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Веденкин Н.А.

Научный руководитель — профессор, к.т.н. Никитин В.А.

ТулГУ, Тула

E-mail: nik.v.v@mail.ru

Гомогенными пластмассами называют пластики, в композиции которых отсутствует наполнитель. Основной компонент - полимер, добавки вводят в состав композиции полимерного материала для модификации его свойств.

Особенность механических свойств современных полимеров – существенная зависимость от температурно-временных условий нагружения. Например, разрушающее напряжение может изменяться в десятки раз в зависимости от времени действия или скорости нагружения, то же относится и к упругим характеристикам. Поэтому нельзя говорить о прочности и модуле упругости топлив, не указывая временных и температурных условий их определения.

Можно выделить ряд особенностей поведения полимерного элемента под нагрузкой:

1. Значительная зависимость физических и механических свойств и диаграммы нагружения от температуры. При анализе диаграммы нагружения (при +20°C и при +50°C), четко прослеживается, что при большей температуре пластификация происходит при значительно меньших напряжениях (в 6-7 раз меньше), предел прочности снижается примерно в тех же пропорциях.
2. Ранний переход в пластическую зону деформаций, так как предел текучести для исследуемого полимера (при +20°C) находится в районе 12 МПа.
3. Существенно меньшие допустимые напряжения (сравнению со сталью 3 по пределу прочности σ_b), так как для Ст. 3 $\sigma_b = 370$ МПа, а для исследуемого полимера $\sigma_b = 18-21$ МПа. Следовательно, разрушение происходит при значительно меньших нагрузках.
4. Эффекты памяти, то есть зависимость характеристик материала от истории деформирования и нагружения.
5. Существенная зависимость механических свойств от скорости деформации.

Изменение прочности в зависимости от скорости деформации, как правило, описывается эмпирическими соотношениями типа: $\sigma = a\varepsilon^k$, где ε - скорость деформации; a , k – эмпирические коэффициенты, индивидуальные для каждого типа материала.

Анализ результатов показывает, что в исследованном диапазоне скоростей нагружения от 10-3 до 100 с-1 прочность увеличивается ~ на 25%, модуль ~ на 29%, предельная деформация ~ на 24%. Причем уровень деформаций при скоростях деформирования 10-3, 10-2, 10-1 практически одинаков, и увеличение деформации происходит при скорости деформирования 100 с-1.

Однако эти данные справедливы при относительно невысоких скоростях деформаций (до 100), а как установлено экспериментальным путём при скоростях деформаций, достигающих 102 - 103, прочность материала может возрасти в 2-3 раза.

Производилось математическое моделирование с использованием программного комплекса ANSYS напряжённно-деформированного состояния образцов, представляющих полый цилиндр, при импульсном осевом нагружении. Модель опиралась на один торец и радиально сдерживалась скользящей поверхностью, позволяющей перемещаться только вдоль продольной оси.

Исследования проводились при положительных и отрицательных максимальных температурах. При положительных температурах, как было отмечено ранее, существенно увеличивались предельные деформации, но предел прочности и модуль упругости снижались. Обратная картина наблюдается при минимальной температуре – предел прочности увеличивается (примерно в 10 раз), но полимер становится хрупким и практически не допускает деформаций.

Критериями разрушения служили:

1. Превышение предельно допустимых деформаций, следствием которого является расслоение элемента и его дальнейшая неработоспособность. Данный критерий наиболее

применим при отрицательных температурах, так как допускаемые деформации очень малы.

2. Превышение эквивалентными напряжениями или отдельными его составляющими допустимых значений на относительно долгий период времени, которое приводило к разрушению объекта. Критерий использовался при положительных начальных температурах, так как значения допустимых напряжений, вычисленные даже с учётом коэффициента динамического упрочнения 2,73, были крайне малы.

Исследования проводились для двух материалов при температурах -40°C и $+50^{\circ}\text{C}$. Анализ результатов показал, что начальная конструкция не обеспечивает работоспособности полимерных элементов при данном нагружении. На опорных торцах во всём диапазоне температур возникали напряжения большие, чем предельные значения с учетом упрочнения, а при максимальной положительной температуре максимальные деформации превышали предельно-допустимые. Были даны рекомендации по изменению первоначальной конструкции с целью обеспечения её работоспособности в указанных условиях нагружения.

РАСТЯЖЕНИЕ ДВУХСЛОЙНЫХ ПЛАСТИН ИЗ ГЕКСАГОНАЛЬНЫХ И КУБИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ

Волков М.А., Городцов В.А., Лисовенко Д.С.
ИПМех РАН

E-mail: volkovmikh1@gmail.com

Проведен анализ растяжения тонких двухслойных композитных пластин из одинаково ориентированных гексагональных и кубических кристаллов. Определены зависимости эффективного модуля Юнга и эффективного коэффициента Пуассона пластин от отношений толщин их слоев и коэффициентов податливости кристаллов. Показано, что эффективные характеристики могут существенно отклоняться от значений, предсказанных по правилу смесей.

Введение. В настоящее время активно проводятся исследования, посвященные анализу поведения и поиску новых материалов с отрицательным коэффициентом Пуассона – ауксетиков [1-3]. Существует два основных вида материалов, которым присуще такое поведение: метаматериалы и кристаллы. В работах [4-8] исследовано влияние ауксетического слоя на эффективные характеристики двухслойных и трехслойных композитов. Было показано, эффективный модуль Юнга существенно отличается (в большую сторону) от предсказаний по правилу смесей и что композит, составленный только из материалов с положительным коэффициентом Пуассона, может проявлять ауксетические свойства.

Основная часть. В работе проведен анализ продольного растяжения тонких двухслойных пластин из одинаково ориентированных кубических и гексагональных кристаллов. Кристаллы в слоях ориентированы так, что плоскость пластины ортогональна оси 6-ого и 4-го порядка гексагонального и кубического слоя, соответственно. Декартова система координат x, y, z выбрана так, что z направлена по нормали к плоскости пластины. Кристаллографические системы 123 координат каждого слоя совпадают с декартовой x, y, z . В первом слое находится гексагональный кристалл, а во втором – кубический. Для описания упругости гексагонального кристалла необходимо 5 независимых коэффициентов податливости $(s_{11}^1, s_{12}^1, s_{13}^1, s_{33}^1, s_{44}^1)$, а для кубического – три $s_{11}^2, s_{12}^2, s_{44}^2$. Верхним индексом обозначается номер слоя. Предполагаем, что силы на верхней и нижней поверхностях и изгибный момент отсутствуют, деформации однородны, а пластина растягивается силой P вдоль оси x

$$\varepsilon_{xx}^1 = \varepsilon_{xx}^2, \quad \varepsilon_{yy}^1 = \varepsilon_{yy}^2, \quad \varepsilon_{xy}^1 = \varepsilon_{xy}^2, \quad \int_0^{h_1} \sigma_{xy}^1 z dz + \int_{h_1}^{h_1+h_2} \sigma_{xy}^2 z dz = 0,$$

$$h_1 \sigma_{xx}^1 + h_2 \sigma_{xx}^2 = P, \quad h_1 \sigma_{yy}^1 + h_2 \sigma_{yy}^2 = 0,$$

где h_1 – толщина слоя 1, h_2 – толщина слоя 2. Из решения задачи продольного растяжения определены эффективные модуль Юнга (E^{eff}) и продольный коэффициент Пуассона (ν_{xy}^{eff}) двухслойной пластины

$$E^{\text{eff}} = \frac{P}{(h_1 + h_2) \varepsilon_{xx}^1} = \alpha \langle E \rangle, \quad \alpha = 1 + \frac{\Lambda}{1 + \Lambda} \frac{(v_{xy}^1 - v_{xy}^2)^2}{1 - (v_{xy}^2)^2 + \Lambda (1 - (v_{xy}^1)^2)},$$

$$\langle E \rangle = \frac{1 + \Lambda}{1 + \lambda} E^1, \quad \lambda = \frac{h_2}{h_1}, \quad \Lambda = \lambda \frac{E_2}{E_1} = \frac{h_2 s_{11}^1}{h_1 s_{11}^2}, \quad E^1 = \frac{1}{s_{11}^1}, \quad E^2 = \frac{1}{s_{11}^2},$$

$$\nu_{xy}^{\text{eff}} = \frac{v_{xy}^1 (1 - (v_{xy}^2)^2) + v_{xy}^2 \Lambda (1 - (v_{xy}^1)^2)}{1 - (v_{xy}^2)^2 + \Lambda (1 - (v_{xy}^1)^2)}, \quad \nu_{xy}^1 = -\frac{s_{12}^1}{s_{11}^1}, \quad \nu_{xy}^2 = -\frac{s_{12}^2}{s_{11}^2},$$

где $\langle E \rangle$ – объемный средневзвешенный модуль Юнга, предсказываемый правилом смесей по Фойгту.

С использованием экспериментальных значений коэффициентов податливости из справочника [9] проведен анализ изменчивости эффективного модуля Юнга и эффективного коэффициента Пуассона тонких двухслойных пластин из гексагональных и кубических кристаллов. Анализ касается пластин из всех возможных комбинаций кристаллов.

Установлено, что эффективный модуль Юнга большинства пластин (75%) из двух неауксетических кристаллов практически не отличается от значений, предсказанных по правилу смесей. Если слои имеют близкие значения модуля Юнга (E^1 , E^2) и сильно различающиеся значения коэффициентов Пуассона (ν_{xy}^1 , ν_{xy}^2), то эффективный модуль Юнга пластины может превосходить модуль Юнга наиболее жесткого слоя. Такое поведение имеет место для пластин из гексагонального кристалла CuCl и кубического TetraCyanoEthylene (Рис.1а, $\nu_{xy}^1 = 0.68$, $\nu_{xy}^2 = 0.05$) и из гексагонального кристалла Ti и кубического SnTe–12 mole% GeTe (Рис.2б, $\nu_{xy}^1 = 0.49$, $\nu_{xy}^2 = 0.03$).

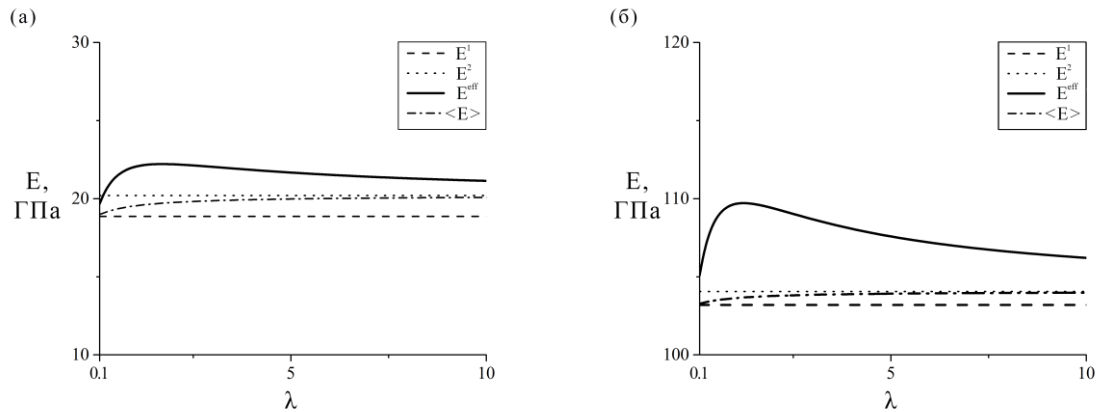


Рис.1 Эффективный модуль Юнга пластин CuCl–TetraCyanoEthylene (а) и Ti- SnTe–12 mole% GeTe (б)

При наличии слоя с отрицательным коэффициентом Пуассона ν_{xy} этот эффект усиливается, количество пластин с таким поведением возрастает и увеличивается различие величин эффективного модуля Юнга и модуля наиболее жесткого слоя. Например, это имеет место в случае пластин Ho–Sm_{0.75}Tm_{0.25}S (Рис.2а, $\nu_{xy}^1 = 0.28$, $\nu_{xy}^2 = -0.46$) и Mn₅Si₃–TmSe (Рис.2б, $\nu_{xy}^1 = 0.49$, $\nu_{xy}^2 = -0.54$).

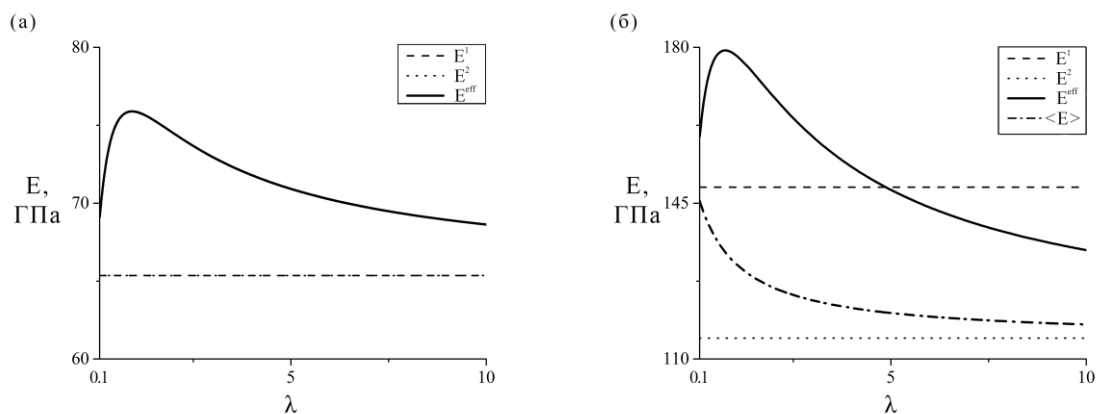


Рис.2 Эффективный модуль Юнга пластин Ho– Sm_{0.75}Tm_{0.25}S (а) и Mn₅Si₃–TmSe (б)

Эффективный продольный коэффициент Пуассона всех рассмотренных пластин ограничен значениями ν_{xy}^1 и ν_{xy}^2 . В некоторых случаях имеет место значительное отклонение его величины от объемного средневзвешенного значения по Фойгту $\langle \nu \rangle$. Величина отклонения зависит от различия в величинах модулей Юнга пластин. Это видно в случае пластины из кристаллов C₇H₁₂ ($E^1=0.74$ ГПа, $\nu_{xy}^2 = 0.76$) и алмаза С ($E^2=1051$ ГПа, $\nu_{xy}^2 = 0.10$) (Рис.3). Эффективный модуль Юнга этой пластины совпадает с $\langle E \rangle$, в то время как ее эффективный коэффициент Пуассона ν_{xy}^{eff} отличается от ν_{xy}^2 при малых λ .

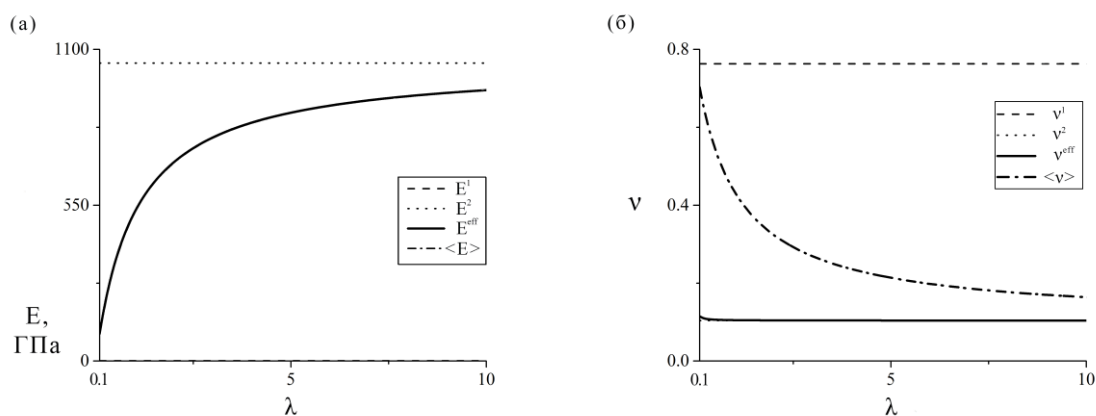


Рис.3 Эффективный модуль Юнга (а) и коэффициент Пуассона (б) пластины C_7H_{12} -C(алмаз)

Заключение. Рассмотрено продольное растяжение тонких двухслойных пластин из одинаково ориентированных гексагональных и кубических кристаллов. Определены зависимости их эффективного модуля Юнга и продольного коэффициента Пуассона от постоянных упругости кристаллов и отношения толщин. Установлено, что в некоторых случаях значения эффективного модуля Юнга и эффективного коэффициента Пуассона отличаются от значений предсказываемых правилом смесей по Фойгту. Если модули Юнга слоев имеют близкие значения, а их коэффициенты Пуассона сильно различаются, то эффективный модуль Юнга пластины может превосходить модуль Юнга наиболее жесткого слоя. Эффективный коэффициент Пуассона всех проанализированных пластин ограничен значениями коэффициентов Пуассона слоев. Наибольшие отклонения эффективного коэффициента Пуассона от значений, предсказываемых правилом смесей, наблюдаются у пластин с большим различием между модулями Юнга слоев.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №18-79-10270.

Литература:

1. Carneiro V.H. et al. Auxetic materials - A review // Mater. Sci.-Pol., 2013, V.31, P.561-571.
2. Kolken H M.A., Zadpoor A.A. Auxetic mechanical metamaterials // RSC Adv., 2017, V.7, P.5111-5129.
3. Ren X. et al. Auxetic metamaterials and structures: a review // Smart Mater. Struct., 2018, V.27, P.023001.
4. Lim T.C. Out-of-plane modulus of semi-auxetic laminates // Eur. J. Mech. A Solids, 2009, V.28, P.752-756.
5. Lim T.C. In-plane stiffness of semiauxetic laminates // J. Eng. Mech., 2010, V.136, P.1176-1180.
6. Streck T. et al. Computational analysis of sandwich-structured composites with an auxetic phase // Phys. Status Solidi B, 2014, V.251, P.354-366.
7. Гольдштейн Р.В., Городцов В.А., Лисовенко Д.С., Волков М.А. Тонкие однородные двухслойные пластины из кубических кристаллов с различной ориентацией слоев // Физ. мезомех., 2018, Т.21, №2, С.5-13.
8. Gorodtsov V.A. et al. Three-layered plate exhibiting auxeticity based on stretching and bending modes // Compos. Struct., 2018, V.194, P. 643-651.
9. Nelson D.F. Second and Higher Order Elastic Constants. Vol. 29a of Landolt-Bornstein - Group III Condensed Matter // Springer, 1992.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ МИКРОСТРУКТУРЫ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ МЕТОДОМ «ПРЕССОВАНИЕ-ВОЛОЧЕНИЕ»

Волокитина И.Е., Камбаров К.

Карагандинский государственный индустриальный университет

E-mail: irinka.vav@mail.ru

Для исследования влияния нового непрерывного способа деформирования «прессование-волочение» на размер зерна металла деформируемой проволоки проводился моделируемый эксперимент с помощью программы DEFORM-3D. В результате изучения модели с несколькими циклами деформирования было выявлено, что с увеличением числа проходов происходит не только общее снижение среднего диаметра зерна, но и постепенное выравнивание данного параметра между центральной и поверхностной зоной.

Для исследования влияния нового непрерывного способа деформирования «прессование-волочение» на размер зерна металла деформируемой проволоки проводился моделируемый эксперимент с помощью программы DEFORM-3D, а точнее, при помощи его вспомогательного модуля MICROSTRUCTURE-3D. Этот модуль позволяет рассматривать эволюцию микроструктуры на каждом шаге деформирования с целью определения необходимого числа циклов деформирования для получения наноструктуры, не прибегая к реальному эксперименту [1-2].

В качестве материала заготовки была выбрана сталь Ст.3 (A 570 Grade 36). Реологические свойства материала были взяты из базы данных DEFORM. Материал заготовки до деформации является изотропным, в нем отсутствуют какие-либо напряжения и деформации. Заготовка, используемая для анализа, имела цилиндрическую форму диаметром 7,0 мм и длиной 300 мм и была разбита на 180 000 конечных элементов, со средней длиной ребра элемента 0,5 мм. С целью исключения застревания проволоки в каналах матрицы при моделировании было принято условие минусового допуска на диаметр проволоки и плюсового допуск на отверстие равноканальной ступенчатой матрице. Материал равноканальной матрицы и пуансона были приняты абсолютными жесткими. Модель заготовки была принята, как упругопластическая. Температура заготовки, как и температура матрицы, была выбрана равной 20°C - для получения оптимальных значений параметров НДС и усилий деформирования.

Так же для моделируемого эксперимента, согласно литературному обзору, были заданы значения коэффициента трения между заготовкой, матрицей $\mu=0,08$; коэффициент теплообмена с окружающей средой, равный 1; скорость волочения была равна действующей скорости на волочильном стане 1,5 м/с. Скорость прессования была установлена в соответствии с согласованием скоростей в 1,36 раз меньше скорости волочения и равна 1.1 м/с.

После расчета модели были получены следующие результаты эволюции микроструктуры (Рис. 1). После прохождения каналов матрицы за счет реализации сдвиговой деформации происходит измельчение зерна с 20 мкм до 12 мкм. После стадии волочения размер зерна также изменяется, но менее интенсивно – с 12 мкм до 9 мкм.

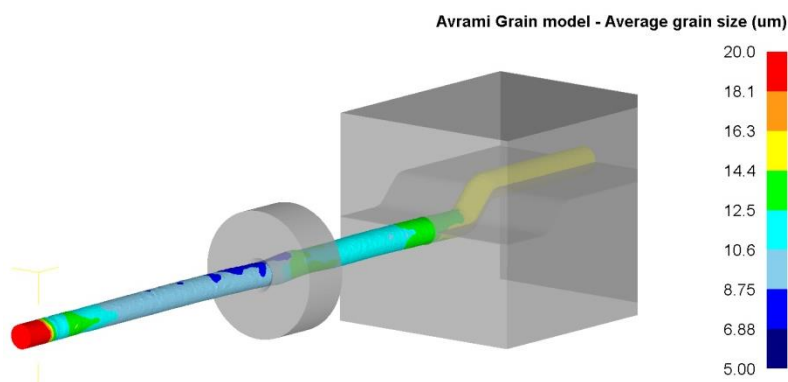


Рис. 1. Изменение размера зерна

Центральные слои заготовки во время обеих стадий деформирования прорабатываются менее интенсивно – здесь размер зерна меняется с 20 мкм до 15 мкм после равноканального углового прессования (РКУП) и до 13 мкм после волочения. Таким образом, после одного цикла деформирования, разница значений размера зерна между поверхностной и центральной зоной составляет 4 мкм.

Это позволяет сделать вывод, что при осуществлении данного совмещенного процесса проработка заготовки по сечению осуществляется неравномерно, и для выравнивания свойств по сечению необходимо проводить несколько циклов деформирования.

Многопроходное деформирование осуществлялось при следующих условиях:

- 1-ый проход: заготовка диаметром 7,0 мм проходила через матрицу с диаметром канала 7,0 мм и далее подвергалась волочению через волоку диаметром 6,5 мм;

- 2-ой проход: заготовка диаметром 6,5 мм проходила через матрицу с диаметром канала 6,5 мм и далее подвергалась волочению через волоку диаметром 6,0 мм;

- 3-ий проход: заготовка диаметром 6 мм проходила через матрицу с диаметром канала 6,0 мм и далее подвергалась волочению через волоку диаметром 5,5 мм.

В результате были получены следующие данные (Рис. 2). После второго прохода измельчение зерна уже не такое интенсивное, как в первом проходе. Здесь средний диаметр зерна после РКУП в поверхностной зоне составил 5 мкм, в центральной зоне – 8 мкм, т.е. разница составила 3 мкм. После волочения размер зерна в поверхностной зоне составил 4 мкм, в центральной зоне – 6 мкм - разница составила 2 мкм.

После третьего прохода средний диаметр зерна после РКУП в поверхностной зоне составил 2 мкм, в центральной зоне – 3 мкм, т.е. разница составила лишь 1 мкм. После волочения размер зерна в поверхностной зоне составил 1 мкм, в центральной зоне – 2 мкм – разница также составила 1 мкм.

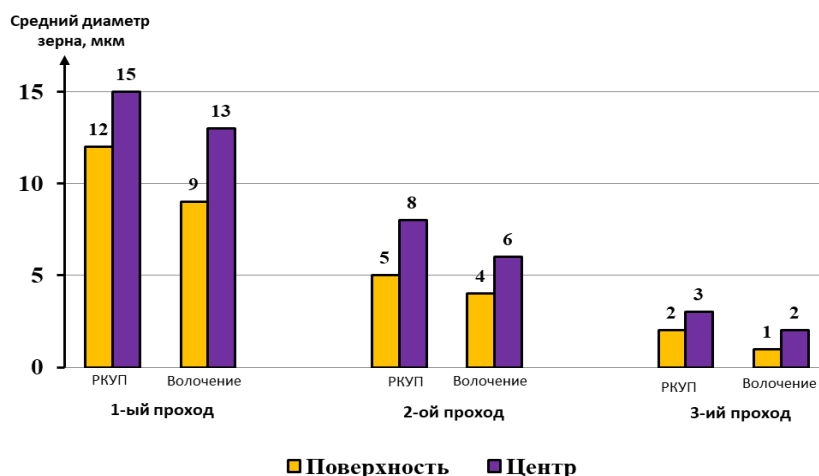


Рис. 2. Изменение размера зерна при многопроходном деформировании

Таким образом, в результате изучения модели с несколькими циклами деформирования было выявлено, что с увеличением числа проходов происходит не только общее снижение среднего диаметра зерна, но и постепенное выравнивание данного параметра между центральной и поверхностной зоной.

Литература

1. С. Н. Лежнев, И. Е. Волокитина, А. В. Волокитин. Эволюция микроструктуры и механических свойств стали в процессе “прессование–волочение”. Физика металлов и металловедение, 2017, Т. 118, № 11, с. 1236–1240.
2. И. Е. Волокитина, А. В. Волокитин. Эволюция микроструктуры и механических свойств меди в процессе “прессование–волочение”. Физика металлов и металловедение, 2018, Т. 119, № 9, с. 971–976.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛН ПОХГАММЕРА – КРИ В ЗАДАЧАХ НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ ДИАГНОСТИКИ

Гаджибеков Т.А.

Научный руководитель — профессор, д.ф.-м.н. Кузнецов С.В.

МГТУ им. Н. Э. Баумана, каф. Прикладная математика

E-mail: 90-region@mail.ru

В качестве метода для неразрушающего определения свойств материалов и диагностики наличия дефектов часто применяются продольные аксиально симметричные волны Похгаммера – Кри.

Для определения свойств материалов обычно используют два длинных цилиндрических стержня Гопкинсона (иногда называемых стержнями Кольского), между которыми размещают исследуемый образец, как правило, также цилиндрической формы.

При ударном воздействии, приложенном к левому торцу первого стержня Гопкинсона, распространяется импульс со скоростью близкой к второй предельной скорости, далее на границе поверхностей между первым стержнем и образцом часть энергии, переходит в образец, а часть отражается, при этом энергия отраженной и рефрагированной волн зависит от соотношения импедансов материала стержня и образца. На следующей границе между образцом и вторым стержнем Гопкинсона происходит аналогичное явление. Было установлено, что в случае более продолжительных импульсов, низкочастотные составляющие фундаментальной моды, распространяющиеся с большей скоростью, имеют и большие амплитуды.

Неразрушающий контроль дефектных зон в стержнях и трубах, также основан на генерировании в основном продольных аксиально симметричных волн и исследовании отражения и изменения их дисперсионных кривых при распространении по участкам с измененными свойствами.

В последние годы для возбуждения различных мод волн Похгаммера – Кри получили методы, основанные на применении электромагнитно-акустических преобразователей (ЭМАП) поверхностных волн, причем наряду с продольными модами, удается возбуждать и крутильные моды. Одним из неоспоримых достоинств ЭМАП устройств является возможность их применения в полевых условиях, когда невозможно обеспечить идеальный контакт между устройством и объектом.

Рассматривается два основных случая: (1) вариация коэффициента Пуассона и (2) вариация модуля упругости материала стержня, получены следующие результаты:

1. Вариация коэффициента Пуассона. Результат изменения относительного значения первой предельной скорости, при вариации коэффициента Пуассона показывает, что в области высоких частот фазовая скорость является информативной для определения коэффициента Пуассона материала.

2. Вариация модуля упругости. В результате получено, что в окрестности второй предельной скорости исследуемые дисперсионные кривые являются информативными для определения модуля упругости материала.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ СВАРКЕ ДАВЛЕНИЕМ НА ФОРМИРОВАНИЕ ТВЕРДОФАЗНОГО СОЕДИНЕНИЯ РАЗНОРОДНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ

Галиева Э.В., Ахунова А.Х.

Научный руководитель: д.т.н., Лутфуллин Р.Я.

ФГБУН ИПСМ РАН

E-mail: Galieva_elvina_v@mail.ru

Актуальным вопросом сегодняшнего дня является разработка методов получения надежных неразъемных соединений сваркой из разнородных сплавов на основе никеля. Применительно к жаропрочным никелевым сплавам (ЖНС), упрочняемым интерметаллидной γ' -фазой (Ni_3Al) и интерметаллидным сплавам на основе Ni_3Al , перспективным методом получения твердофазных неразъемных соединений является сварка давлением в твердом состоянии. В представленной работе методом физического и расчетного моделирования показано, что сварка давлением с частичным использованием явления сверхпластичности (СП) позволяет получать твердофазное соединение (ТФС) между литым монокристаллическим интерметаллидным сплавом на основе Ni_3Al и деформируемыми поликристаллическими ЖНС. Преимуществом частичного использования СП является уникальная возможность обеспечения минимизации пластической деформации интерметаллидного сплава. Сформулировано условие для формирования качественного неразъемного соединения при сварке давлением составных разнородных образцов - достаточно, чтобы хотя бы один из соединяемых в паре материалов проявлял СП.

Введение. Для получения неразъемных соединений в биметаллических деталях применяют различные способы: горячее изостатическое прессование, высокотемпературную пайку, электронно-лучевую сварку, сварку взрывом, диффузионную сварку. Одним из наиболее привлекательных методов получения неразъемных биметаллических соединений из ЖНС является метод сварки давлением (СД) в условиях СП [1]. Необходимо отметить, что, ЖНС являются труднодеформируемыми и имеют низкую технологичную пластичность. Поэтому для изготовления деталей из таких сплавов целесообразно применение технологии СП деформации [1-6]. На практике для каждого конкретного никелевого сплава требуется разработка режимов деформационно-термической обработки, обеспечивающих получение полуфабрикатов с ультрмелкозернистой (УМЗ) структурой типа микродуплекс, которая необходима для сверхпластической деформации при изготовлении деталей газотурбинных двигателей (ГТД). В работе приведены результаты исследований СП никелевых сплавов и данные компьютерного и физического моделирования СД.

Материалы и методы исследования. Материалом для исследований являлись поликристаллические деформируемые никелевые сплавы ЭП975 и ХН58МБЮД (ЭК61), а также монокристаллические литейные интерметаллидные сплавы на основе Ni_3Al (ВКНА-моно и ВКНА-25).

Испытания на определение СП характеристик проводили при различных температурах и скоростях деформации на установке Instron 1185. СД проводили в условиях низкотемпературной СП никелевых сплавов ХН58МБЮД и ЭП975 при температурах 800 и 950 °С (Рис.1).

Сверхпластичность никелевых сплавов. Показано, что формирование УМЗ структуры со средним размером зерен фаз менее 1 мкм позволяет реализовать эффект низкотемпературной СП в сплаве ХН58МБЮД в интервале температур 750 °С-900 °С. Максимальные сверхпластические характеристики достигаются при температуре 800 °С, относительное удлинение при этой температуре составило 1431% (Рис. 1а).

На примере сплава ЭП975 показано, что формирование УМЗ структуры со средним размером зерен γ -фазы $0,8 \pm 2$ мкм обеспечивает снижение температуры проявления СП. При этом, максимальное удлинение составляет 1490% при 950 °С. Сравнительный анализ этих результатов с данными, полученными ранее, при изучении другого структурного состояния этого сплава (средний размер зерен γ -фазы 7-8 мкм и γ' -фазы 3 мкм), показал, что в последнем случае эффект СП наблюдался при температуре 1125 °С, что выше на 175 °С по сравнению с УМЗ материалом (Рис.1б).

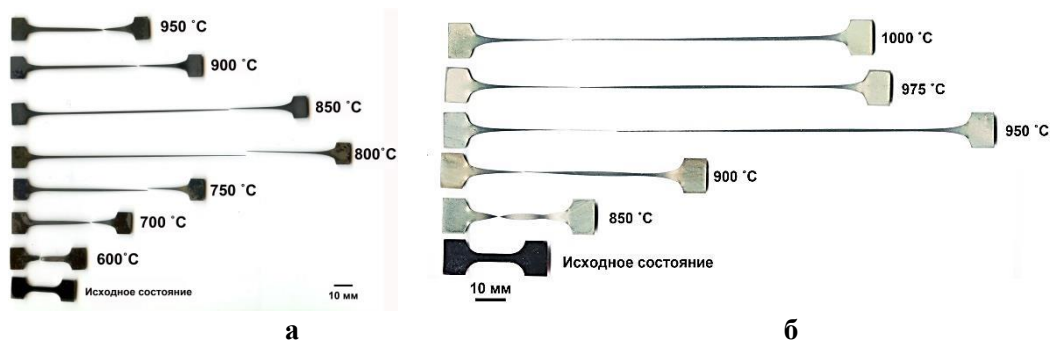


Рис. 1. Сверхпластичность никелевых сплавов ХН58МБЮД (а) и ЭП975 (б)

Твердофазное соединение деформируемых ЖНС с литыми интерметаллидными сплавами на основе Ni_3Al . СД никелевого сплава ЭК61 с интерметаллидным на основе Ni_3Al проводили при 800 °С, а никелевого сплава ЭП975 с интерметаллидным на основе Ni_3Al при 950 °С, при которых наблюдали максимальную СП исследуемых ЖНС.

На рисунках 2 и 3 представлены результаты компьютерного и физического моделирования, соответственно. По результатам компьютерного моделирования видно, что при принятой в эксперименте схеме СД создаются условия для минимизации пластической деформации интерметаллидного сплава, необходимые для сохранения высоких жаропрочных свойств материала с монокристаллической структурой (рис.2).

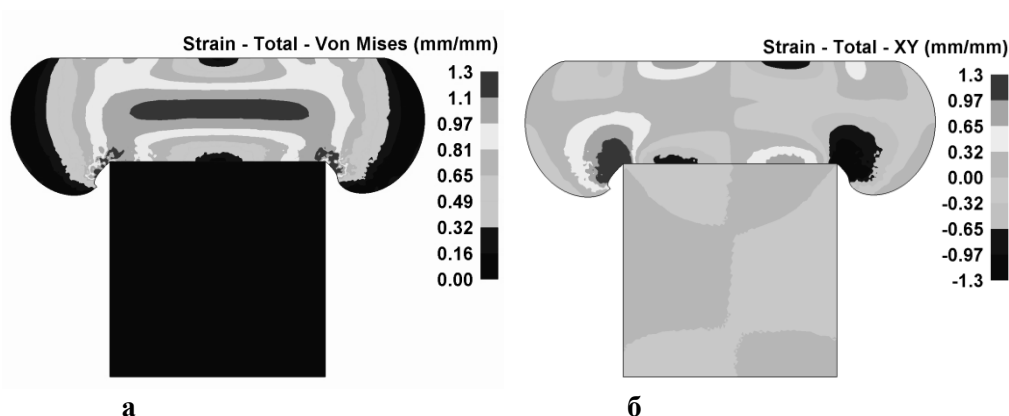


Рис.2. Распределение интенсивности деформации (а) и сдвиговой деформации (б) образцов после СД никелевого сплава ХН58МБЮД с интерметаллидным ВКНА-моно при $T=800$ °С:.

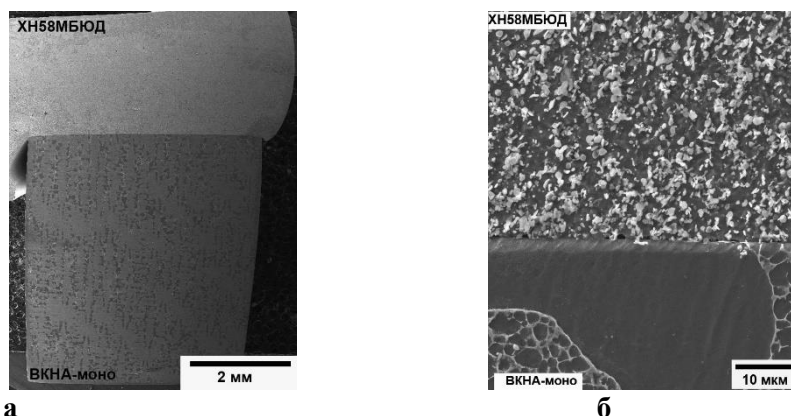


Рис. 3. СД никелевого сплава ХН58МБЮД с интерметаллидным ВКНА-моно при $T=800$ °С: общий вид (а) и локальный участок зоны ТФС (б) образцов после СД

Эти данные коррелируют с результатами физического моделирования (рис.3). Показано, что

вся деформация локализуется в ЖНС с предварительно подготовленной УМЗ структурой. Как видно из рисунка 3а, интерметаллидный сплав испытывает незначительную деформацию – наблюдается легкое «бочкообразование».

Выводы. Установлено, что метод сварки давлением в условиях сверхпластичности позволяет получать твердофазное соединение литого интерметаллидного сплава на основе Ni_3Al с деформируемыми никелевыми сплавами. Условием формирования качественного неразъемного твердофазного соединения является возможность проявления эффекта сверхпластичности одним из соединяемых образцов из деформируемого никелевого сплава, например, сплава ХН58МБЮД или ЭП975.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-19-00685). Экспериментальные исследования были выполнены на базе Центра коллективного пользования научным оборудованием ИПСМ РАН.

Литература

1. Поварова, К.Б. Изучение свойств и выбор сплавов для дисков с лопатками («Блисков») и способа их соединения / К.Б. Поварова, В.А. Валитов, С.В. Овсепян, А.А. Дроздов, О.А. Базылева, Э.В. Валитова (Галиева Э.В.) // Металлы. – 2014. – №5 – С. 61-70.
2. Пат. 2608118 Российская Федерация, МПК В 23 К 20/14, В 23 К 20/22 Способ изготовления биметаллического изделия / Валитов В.А., Мулюков Р.Р., Оспенникова О.Г., Поварова К.Б., Базылева О.А., Галиева Э.В., Лутфуллин Р.Я., Овсепян С.В., Дмитриев С.В., Ахунова А.Х., Дроздов А.А., Мухаметрахимов М.Х.; заявитель и патентообладатель ИПСМ РАН. - № 2015128846; заявл. 15.07.2015; опубл. 13.01.2017, Бюл. 2.
3. Valitova, E.V. Pressure welding of nickel-based 58Ni-Cr-Mo-B-Al-Cu alloy under low-temperature superplasticity conditions / E.V. Valitova, R.Ya. Lutfullin, M.Kh. Mukhametrahimov, V.A. Valitov, A.Kh. Akhunova, S.V. Dmitriev // Letters on materials. – 2014. – Vol.4 – №4 – P. 291-294.
4. Galieva, E.V. Experimental and simulation modelling Nickel-based alloy pressure welding. / E.V. Galieva, V.A. Valitov., R.Ya. Lutfullin, S.V. Dmitriev, Akhunova A. Kh., Mukhametrakhimov M. Kh.// Materials Science Forum. – 2016. – Vol. 838-839. – P. 350-354.
5. Galieva, E.V. Effect of surface relief on solid phase joining of heat-resistant nickel superalloys / E.V. Galieva, R.YA. Lutfullin, A.KH. Akhunova, V.A. Valitov, S.V. Dmitriev / Science and technology of welding and joining. 2018. P. 1-7. <https://doi.org/10.1080/13621718.2018.1440992>
6. Валитова, Э.В. Влияние скорости и температуры деформации на микроструктуру и свойства ультрамелкозернистого свариваемого сплава ХН58МБЮД. / Э.В. Валитова, Р.Я. Лутфуллин, В.А. Валитов // Перспективные материалы. – 2013. – №15 – С. 30-34.

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ В ПЛАСТИНЕ С ДВУМЯ КРУГЛЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ

Гандилян Д.В.^{1,2}

Научный руководитель – доцент, д.ф.-м.н. Устинов К.Б.¹

¹ ИПМех РАН, ² МГУ им. М.В. Ломоносова

david.ghandilyan@mail.ru

Рассмотрена задача о двух равных отверстиях в плоскости при равномерном всестороннем растяжении с учетом эффектов поверхностной упругости. Задача решается в приближении плоской деформации с использованием биполярных координат и разложения в ряд. Решение представляет интерес для случая достаточно близких отверстий. В этом случае, несмотря на довольно простую геометрию, из-за небольшого расстояния между отверстиями можно ожидать появления сравнительно значимых различий между поверхностными и объемными свойствами.

В настоящее время привлекают внимание задачи, связанные с поверхностной упругостью. Важным свойством поверхностей для твердых тел является поверхностное напряжение. Общая методология получения аналитических решений для задач, связанных с эффектами поверхностной упругости, заключается в использовании конкретных граничных условий, соответствующих уравнениям поверхностной упругости. Между тем, количество полученных аналитических решений для конкретных задач ограничено, может быть связано с довольно неудобным видом граничных условий. Большинство полученных решений ограничено простыми геометриями, например простейшим случаем в плоскости является тот, который содержит одно круглое отверстие, рассмотренный в [1], является наименее интересным с точки зрения влияния поверхностных эффектов, поскольку в этом случае они являются минимальными. В данной работе рассмотрена задача о двух равных круглых отверстиях в плоскости при равномерном всестороннем растяжении. Данная задача представляет интерес в случае двух близких круговых отверстиях.

Общее решение для компонент напряжения в пластине, содержащей два круглых отверстия, было получено в [2]. Естественно, что такие общие решения не дают много информации о численном аспекте проблемы. Ввиду важности задачи с двумя круглыми отверстиями в инженерных приложениях, считается, что также необходимо обсудить эту проблему более подробно. Задача о пластине, включающая две круговые границы, лучше всего решать с помощью биполярных координат. Общее обсуждение напряжений и деформаций в биполярных координатах было дано в [3]. Тем не менее, задача для пластины, содержащей два равных отверстия, не была решена так полно, как она того заслуживает. В данной работе решение этой задачи, несколько отличающееся от решения [2], будет соответствовать нескольким основным системам напряжений, действующим в пластине. Параметрические коэффициенты, используемые в решении, получены в явном виде в терминах биполярных координат.

Рассмотрена задача о двух равных отверстиях в плоскости при равномерном всестороннем растяжении с учетом эффектов поверхностной упругости. Задача решается в приближении плоской деформации с использованием биполярных координат и разложения в ряд. Решение представляет интерес для случая достаточно близких отверстий. В этом случае, несмотря на довольно простую геометрию, из-за небольшого расстояния между отверстиями можно ожидать появления сравнительно значимых различий между поверхностными и объемными свойствами. Также, расширив решение Джеффери в [2] и использовав данные по модулю поверхностной упругости в [4], было вычислено поверхностное напряжение.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН I. 16.

Литература

1. Уфлянд Я.С. Биполярные координаты в теории упругости. М.; Л.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1950. 232 с.
2. Jeffery G.V. Plane stress and plane strain in bipolar coordinates. Phil. Trans. of the Roy. Soc. of London, ser. A, vol. 221, 1921, p. 265.

3. Ching-Bing Ling. On the stresses in a plate containing two circular holes. Journ. of appl. Phys., vol. 19, № 1, 1948, p. 77.
4. Shenoy V.B. Atomistic calculations of elastic properties of metallic fcc crystal surfaces. Phys. Rev. B Condens. Matter Mater. Phys., vol. 71, 2005, p. 11.

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ХРУПКИХ И ПЛАСТИЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБРАЗЦАХ В ХОДЕ ОДНООСНОГО РАСТЯЖЕНИЯ

Байкова Е.И.¹, Ченцов А.В.²

¹МАИ, ²ИПМех РАН

E-mail: truechernyydrakon@inbox.ru

С целью изучения механических свойств хрупких и пластичных полимерных материалов при одноосном растяжении с постоянной скоростью проведена серия экспериментов на малоразмерных образцах различных типов. В условиях современных реалий, когда все чаще используются различные полимеры в разработке множества изделий, имеющих широкое применение, важно как можно более подробно изучить поведение материалов при всевозможных условиях внешнего воздействия и пределы их возможностей до момента начала необратимых растяжений. Рассматривался случай одноосного растяжения с постоянной по времени скоростью. Представлены результаты обработки экспериментов и проанализированы известные стандарты на подобные виды испытаний.

Эксперимент проводился на разрывной машине «MTS Synergie 400». На ребристую поверхность зажимов дополнительно подкладывалась наждачная бумага во избежание возможного выскользывания образцов и для уменьшения возможного повреждения образцов на этапе начала испытаний. Эксперимент по одноосному растяжению проводился на двух различных типах образцов: полиоксибутират (POB), полилактид (PLA) с добавкой пластификатора. Предварительно заготовленные прямоугольные малоразмерные полимерные образцы (POB (1-й образец): ширина – 2.3 мм, толщина – 0.04 мм; POB (2-й образец): ширина – 1.6 мм, толщина – 0.042 мм; PLA – ширина – 1.1 мм, толщина – 0.277 мм) были закреплены между двумя зажимами. Произведено одноосное растяжение образцов со скоростью 0.5 мм/мин. В ходе эксперимента были получены навыки управления установкой «MTS Synergie 400» и её программным обеспечением.



Рис. 1. Внешний вид зажимов без образца и с образцом

Полученные данные были занесены в Microsoft Excel и обработаны. По диаграммам деформирования были сделаны выводы о хрупком (POB) или пластичном (PLA) поведении материалов. Рассчитанный модуль Юнга для PLA с добавкой пластификатора составил $E = 64$ МПа.

Работа выполнена по теме госзадания № АААА-А17-117021310373-3 и частично в рамках проекта РФФИ № 17-01-00526.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОСКИХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ МЕХАНОДИФFUЗИОННЫХ КОЛЕБАНИЯХ БАЛКИ ТИМОШЕНКО С УЧЕТОМ РЕЛАКСАЦИИ ДИФFUЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Гафуров У.С.^{1,2}, Земсков А.В.^{1,2}

¹МАИ

²НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова

E-mail: for.illusion@yandex.ru

Рассматриваются нестационарные колебания балки Тимошенко с учетом многокомпонентного массопереноса. В общем случае балка находится под действием растягивающих усилий, изгибающих моментов и перерезывающих сил, заданных на её концах. Также же заданы плотности диффузионных потоков. Все перечисленные силовые факторы находятся в плоскости изгиба балки. Для решения задачи применяется интегральное преобразование Лапласа по времени и разложение в ряды Фурье по пространственной координате.

Введение. Для моделирования технологических процессов внедрения, при которых конструкционный элемент находится под действием изгибающих нагрузок, используются нестационарные балочные модели механики сплошных сред, учитывающие явление массопереноса. Так как балки, наряду с пластинами и оболочками являются наиболее распространенными моделями, описывающими напряженно-деформированное состояние элементов конструкций, работающих на изгиб, представляется интересным их применение при расчёте таких ответственных элементов, как стрингеры, лонжероны, а также, в известной степени, лопатки газотурбинных и турбовентиляторных авиационных двигателей.

Постановка задачи. В работе рассматривается задача о плоских нестационарных упругодиффузионных колебаниях балки Тимошенко с учетом релаксации диффузионных процессов. Балка находится под действием растягивающих усилий, изгибающих моментов и перерезывающих сил, заданных на её концах. Также заданы плотности диффузионных потоков на торцевых поверхностях.

Для построения уравнений изгиба принимаются, что:

- 1) Поперечные прогибы балки малы.
- 2) Сечения, перпендикулярные к оси балки до деформации, остаются плоскими и после деформации, но могут поворачиваться относительно этой оси на некоторый угол.
- 3) Материал балки изотропный.
- 4) Боковая поверхность свободна от механических нагрузок, что позволяет использовать гипотезу о несжимаемости балки в поперечном направлении.

Таким образом, данная модель является уточнением модели упругодиффузионной балки Эйлер-Бернулли [1], позволяющем учитывать касательные напряжения, возникающие при изгибе стержневых элементов конструкций.

Далее, модель нестационарного изгиба для упругодиффузионной балки Тимошенко в плоскости Ox_1x_2 строится с помощью вариационного принципа Гамильтона, что приводит к следующим уравнениям [2-4]:

$$\begin{aligned} \ddot{v} - \mu k^2 (v'' - \chi') + \frac{q}{F} = 0, \quad \dot{H}_q + \tau_q \ddot{H}_q - D_q H_q'' - \Lambda_q \chi''' - \frac{z^{(q)}}{J_3} = 0, \\ \ddot{\chi} - \chi'' - \frac{F}{J_3} \mu k^2 (v' - \chi) + \sum_{q=1}^N \alpha_q H_q' - \frac{m}{J_3} = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

В случае чистого изгиба балки под действием изгибающего момента M уравнения (1) дополняются граничными условиями

$$\begin{aligned} \left(\chi' + \sum_{q=1}^N \alpha_q H_q \right) \Big|_{x_1=0} = -\frac{M}{J_3}, \quad \left(\chi' + \sum_{q=1}^N \alpha_q H_q \right) \Big|_{x_1=1} = -\frac{M}{J_3}, \\ v \Big|_{x_1=0} = V_0, \quad v \Big|_{x_1=1} = V_1, \quad H_q \Big|_{x_1=0} = H_{q0}, \quad H_q \Big|_{x_1=1} = H_{q1}. \end{aligned} \quad (2)$$

Начальные условия принимаются нулевыми.

В задаче (1), (2) все величины являются безразмерными, для которых приняты следующие

обозначения

$$x = \frac{x_1}{l}, v = \frac{v^*}{l}, \chi = \frac{\chi^*}{l}, \tau = \frac{Ct}{l}, \tau_q = \frac{C\tau^{(q)}}{L}, C_{ijkl} = \frac{C_{ijkl}^*}{C_{1111}^*}, C^2 = \frac{C_{1111}^*}{\rho}, \alpha_q = \frac{\alpha_{11}^{(q)}}{C_{1111}^*},$$

$$D_q = \frac{D_{11}^{(q)}}{Cl}, \Lambda_q = \frac{m^{(q)}D_{11}^{(q)}\alpha_{11}^{(q)}n_0^{(q)}}{\rho RT_0 Cl}, m = \frac{\rho lm^*}{C_{1111}^*}, q = \frac{\rho l q^*}{C_{1111}^*}, z^{(q)} = \frac{l z^{*(q)}}{C},$$

где t – время; x_i – прямоугольные декартовы координаты; v^* – прогиб балки; χ^* – угол поворота сечения относительно оси Ox_3 ; l – длина балки; $\eta^{(q)} = n^{(q)} - n_0^{(q)}$ – приращение концентрации q -ой компоненты вещества в составе N – компонентной среды; $n^{(q)}$ и $n_0^{(q)}$ – актуальная и начальная концентрации q -го вещества; C_{ijkl}^* – компоненты тензора упругих постоянных; ρ – плотность; $\alpha_{ij}^{(q)}$ – коэффициенты, характеризующие объёмное изменение среды за счёт диффузии; $D_{ij}^{(q)}$ – коэффициенты самодиффузии; R – постоянная Больцмана; T_0 – температура среды; $m^{(q)}$ – молярная масса q -го вещества, q^* – распределенная по длине балки перерезывающая сила; m^* – распределенный по длине балки изгибающий момент; $z^{(q)}$ – распределенные по длине балки источники массопереноса; F – площадь сечения балки (безразмерная); J_3 – момент инерции сечения балки относительно оси Ox_3 (безразмерный); k – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения касательных напряжений по сечению балки; τ^q – время релаксации диффузионных возмущений.

Метод решения. Решение задачи ищется в виде [5]:

$$v(x, \tau) = \sum_{k=1}^{N+2} \int_0^\tau \left[G_{1k}(x, \tau-t) f_{k1}(t) + G_{1k}(1-x, \tau-t) f_{k2}(t) + \int_0^1 \tilde{G}_{1k}(x, \xi, \tau-t) F_k(\xi, t) d\xi \right] dt,$$

$$\chi(x, \tau) = \sum_{k=1}^{N+2} \int_0^\tau \left[G_{2k}(x, \tau-t) f_{k1}(t) - G_{2k}(1-x, \tau-t) f_{k2}(t) + \int_0^1 \tilde{G}_{2k}(x, \xi, \tau-t) F_k(\xi, t) d\xi \right] dt,$$

$$\eta_q(x, \tau) = \sum_{k=1}^{N+2} \int_0^\tau \left[G_{q+2,k}(x, \tau-t) f_{k1}(t) + G_{q+2,k}(1-x, \tau-t) f_{k2}(t) \right] dt +$$

$$+ \sum_{k=1}^{N+2} \int_0^\tau \int_0^1 \tilde{G}_{q+2,k}(x, \xi, \tau-t) F_k(\xi, t) d\xi dt.$$

где G_{mk} – поверхностные функции Грина, удовлетворяющие уравнениям

$$\ddot{G}_{1k} - \mu k^2 (G_{1k}'' - G_{2k}') = 0, \quad \dot{G}_{q+2,k} + \tau_q \ddot{G}_{q+2,k} - D_q G_{q+2,k}'' + \Lambda_q G_{2k}''' = 0,$$

$$\ddot{G}_{2k} - G_{2k}'' - \frac{F}{J_3} \mu k^2 (G_{1k}' - G_{2k}) + \sum_{q=1}^N \alpha_q G_{q+2,k}' = 0, \quad (3)$$

и граничным условиям:

$$G_{1l}|_{x_1=0} = \delta_{1k} \delta(\tau), \quad G_{1k}|_{x_1=1} = 0, \quad G_{q+1,k}|_{x_1=0} = \delta_{q+1,k} \delta(\tau), \quad G_{q+1,k}|_{x_1=1} = 0,$$

$$\left(G_{2k}' - \sum_{j=1}^N \alpha_j G_{j+1,k} \right) \Big|_{x_1=0} = \delta_{2k} \delta(\tau), \quad \left(G_{2k}' - \sum_{j=1}^N \alpha_j G_{j+1,k} \right) \Big|_{x_1=1} = 0. \quad (4)$$

\tilde{G}_{mk} – объёмные функции Грина, удовлетворяющие уравнениям

$$\begin{aligned} \ddot{\tilde{G}}_{1k} - \mu k^2 (\tilde{G}_{1k}'' - \tilde{G}_{2k}') + \delta_{1k} \delta(x - \xi) \delta(\tau) &= 0, \\ \ddot{\tilde{G}}_{2k} - \tilde{G}_{2k}'' - \frac{F}{J_3} \mu k^2 (\tilde{G}_{1k}' - \tilde{G}_{2k}) + \sum_{q=1}^N \alpha_q \tilde{G}_{q+2,k}' + \delta_{2k} \delta(x - \xi) \delta(\tau) &= 0, \\ \dot{\tilde{G}}_{q+2,k} + \tau_q \ddot{\tilde{G}}_{q+2,k} - D_q \tilde{G}_{q+2,k}'' + \Lambda_q \tilde{G}_{2k}''' + \delta_{q+2,k} \delta(x - \xi) \delta(\tau) &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

и однородным граничным условиям соответствующим (4)

Величины $F_1(x, \tau) = m/J_3$, $F_2(x, \tau) = q$ и $F_{q+1}(x, \tau) = -z^{(q)}/J_3$ представляют собой объемные силовые факторы, входящие в уравнения (1); $f_{kl}(t)$ - поверхностные возмущения, которые имеют вид:

$$\begin{aligned} f_{11}(\tau) &= -\frac{M(\tau)}{J_3}, \quad f_{12}(\tau) = -\frac{M(\tau)}{J_3}, \\ f_{21}(\tau) &= V_0(\tau), \quad f_{22}(\tau) = V_1(\tau), \quad f_{q+2,1}(\tau) = H_{q0}(\tau), \quad f_{q+2,2}(\tau) = H_{q1}(\tau). \end{aligned}$$

Для нахождения функций Грина применяется интегральное преобразование Лапласа по времени и разложение в ряды Фурье [5]. В результате преобразований задача сводится к системе линейных алгебраических уравнений относительно изображений коэффициентов разложения функций поперечных смещений, углов поворота и приращений концентраций. После решения системы производится переход к оригиналам с помощью известных теорем о вычетах [6].

Литература

1. Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Постановка задачи о нестационарных упругодиффузионных колебаниях балки Эйлера-Бернулли. // Материалы XXIV Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т.2. – М.: ООО «ТРП», 2018. – С. 152-157.
2. Земсков А.В., Гафуров У.С. Постановка задачи о плоских нестационарных упругодиффузионных колебаниях балки Тимошенко // Тезисы докладов VII Международного научного семинара «Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы». – М.: ООО «ТР-Принт», 2018. – С. 30-32.
3. Михайлова Е.Ю., Тарлаковский Д.В., Федотенков Г.В. Общая теория упругих оболочек: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2018. – 112 с.
4. Горшков А.Г., Медведский А.Л., Рабинский Л.Н., Тарлаковский Д.В. Волны в сплошных средах: Учебное пособие: Для вузов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 472 с.
5. Вестяк А.В., Давыдов С.А., Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Нестационарная одномерная задача термоупругой диффузии для однородных многокомпонентных сред с плоскими границами // Ученые записки Казанского университета. Серия физико-математические науки. – 2018. – Т. 160, Книга 1. – С. 183-196.
6. Диткин В.А., Прудников А.П. Операционное исчисление. Учеб. пособие для вузов. Изд. 2, доп. М.: «Высшая школа», 1975, 408 с.

МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МИКРОПОР И ДЕФЕКТНЫХ СТРУКТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Герасимов Р.М.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

E-mail: romagrizly@gmail.com

В рамках работы обсуждаются вопросы, связанные с описанием внутренней структуры поликристаллических материалов. Построена и численно реализована модель, позволяющая описать взаимодействие микропор с дефектами. Для моделирования использовался метод молекулярной динамики. Потенциал межатомного взаимодействия, используемый в работе, основан на модели погруженного атома (EAM). Предложен способ физически обоснованной начальной конфигурации, содержащей микропору. Исследована возможность генерации краевых дислокаций в виде диполя для дальнейшего изучения их взаимодействия с микропорами.

Введение. Внедрение новых и совершенствование известных технологий создания материалов, которые представляют собой металлы и их сплавы, является актуальной задачей, поскольку, несмотря на повсеместное использование металлических конструкций, открытыми остаются вопросы об особенностях внутренней структуры поликристаллов, а, следовательно, и прочностных характеристиках. Известно, что физико-механические свойства материала зависят от его дефектной структуры, под которой следует понимать совокупность дефектной структуры и ее изменение, которое происходит на всех масштабных и/или структурных уровнях. Основными носителями механизмов развития и эволюции поврежденности являются микропоры и микротрещины. В работе основное внимание будет уделено микропорам.

Целью работы является разработка, численная реализация и исследование математической модели взаимодействия точечных и линейных дефектов с микропорами.

Математическая модель. Модели поврежденности в большинстве случаев [1] строятся в рамках классического подхода механики сплошной среды, например, континуальной теории поврежденности и др. Однако такой подход неприменим при исследовании внутренней структуры материалов на уровне атомарных масштабов, поскольку отсутствует возможность введения понятия представительного объема в смысле механики сплошных сред.

Ввиду последнего обстоятельства актуальным является применение метода молекулярной динамики (МД), суть которого заключается в представлении тела в виде совокупности частиц, взаимодействие между которыми происходит согласно законам классической механики Ньютона. Отметим, что метод МД не позволяет создавать модели реальных тел или технологических процессов ввиду больших вычислительных затрат, однако он является мощным теоретическим инструментом, который позволяет исследовать эволюцию внутренней структуры материала на уровне наномасштабов.

В качестве ключевого соотношения в рамках метода МД выступает потенциал межатомного взаимодействия, выбор которого сопоставим с построением определяющих соотношений в рамках классических континуальных моделей. Потенциал межатомного взаимодействия дает количественную зависимость потенциальной энергии взаимодействия частиц от расстояния между ними. На сегодняшний день существует множество моделей потенциалов межатомного взаимодействия [2]. Используемый в работе потенциал был построен с использованием модели погруженного атома (EAM) [3], общий вид которого представлен соотношением:

$$E_{total} = \frac{1}{2} \sum_{i,j(j \neq i)} \Phi(r_{ij}) + \sum_i F(\rho_i), \quad (1)$$

$\Phi(r_{ij})$ – функция парного взаимодействия между атомами i и j ; F – функция погружения, зависящая от электронной плотности ρ_i в данной точке, созданной соседними атомами; r_{ij} – расстояние между частицами i и j . Стоит отметить, что потенциал межатомного взаимодействия зависит как типа исследуемого материала (его химического состава), так и от тех свойств, которые потенциал должен воспроизводить [2].

Результаты моделирования. В работе в качестве исследуемого материала выбрана

бинарная система Fe-C с содержанием углерода около 0.8%, что соответствует высокоуглеродистой стали. Материалы такого типа могут иметь разнообразную внутреннюю структуру, которая обусловлена эксплуатационными характеристиками и зависит от способов обработки. В рамках исследования рассматривается монокристалл Fe-C, имеющий до внедрения дефектов идеальную кристаллическую ОЦК структуру с равномерным распределением атомов С в объеме. Ранее в работе [4] был предложен способ внесения микропор в систему путем извлечения части атомов из объема сферической формы. Стоит отметить, что такой подход является не вполне корректным, поскольку дефектная структура вблизи такой поры остается идеальной, что нарушает общие представления о зарождении микропоры с физической точки зрения, поскольку появление несовершенств в материале (в том числе микропор) связаны с процессами интенсивных пластических деформаций и тех полей напряжений, которые возникают в рамках неупругого деформирования. Поэтому отдельное исследование было направлено на получение физически обоснованной начальной конфигурации, содержащей микропору. Численный эксперимент для поставленной задачи представлял собой следующую процедуру: для идеального ОЦК кристалла Fe-C выполнялось растяжение при наложенных периодических граничных условиях поперек направления деформирования и свободных граничных условиях вдоль направления деформирования до накопленных относительных деформаций 0,05, затем – сжатие до первоначальных размеров. Таким образом, накопленные относительные деформации равнялись 0, однако, вследствие необратимости процессов неупругого деформирования дефектная структура начальной идеальной кристаллической структуры значительно изменялась: появились точечные дефекты типа вакансий, а также дефекты упаковки. Распределение атомов углерода при этом не локализовалось и имело равномерное распределение. Затем в полученной структуре в центре расчетной области «вырезалась» микропора сферической формы. Численные эксперименты показали, что устойчивая микропора имеет радиус 4.2 Å и 5.1 Å в отсутствии внешних нагрузок и при наличии силовых (до 0,05 относительных накопленных деформаций) и температурных (до $T=1000\text{K}$) воздействиях соответственно, что совпадает с результатами, полученными ранее в [4]. Таким образом, устойчивость микропоры при относительно небольших пластических деформациях (до 5%) не зависит от дефектного «окружения» микропоры.

При исследовании взаимодействия микропоры с дислокациями наибольший интерес представляют краевые дислокации, динамика которых связана с появлением несплошностей в материале (например, при образовании дислокации Ломера-Коттрелла [5] и др.). При внесении краевой дислокации в рамках метода МД и последующей релаксации системы обнаруживается, что такая дислокация является неустойчивой и «распадается» в процессе расчета. Тем не менее, при внесении дислокационного диполя, представляющего собой две краевые дислокации в параллельных плоскостях с одинаковыми по модулю, но разными по направлению векторами Бюргерса, такая конфигурация является устойчивой (рис. 1), что предоставляет возможность дальнейшего исследования взаимодействия микропор и краевых дислокаций.

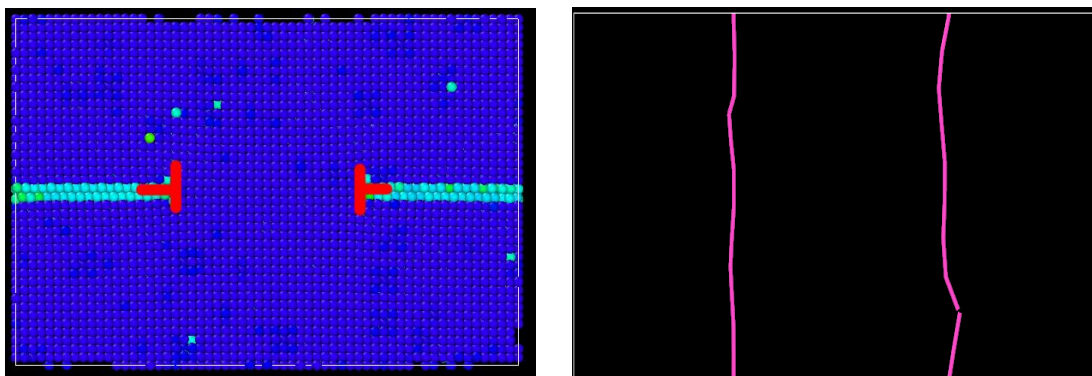


Рис.1. Внесенная в систему диполь краевых дислокаций разных знаков после релаксации системы (слева) и дислокационные линии (вид сверху), выделенные с помощью метода DXA [6] (справа)

Выводы. В ходе работы построена и численно реализована модель, позволяющая описать взаимодействие микропор с дефектами. Для моделирования использовался метод МД и потенциал межатомного взаимодействия типа ЕАМ. Предложен способ физически обоснованной начальной конфигурации, содержащей микропору. Кроме того, была исследована возможность генерации краевых дислокаций в виде диполя для дальнейшего изучения их взаимодействия с микропорами.

Литература

1. Волегов П.С., Грибов Д.С., Трусов П.В. Поврежденность и разрушение: обзор экспериментальных работ // Физическая мезомеханика – 2015. – Т. 18, № 3. – С. 11-24. DOI: 10.1134/S1029959916030103
2. Волегов П.С., Герасимов Р.М., Давлятшин Р.П. Модели молекулярной динамики: обзор ЕАМ-потенциалов. Часть 1: Потенциалы для однокомпонентных систем // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № 4. – С. 214-237. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.14
3. Murray S. Daw and M. I. Baskes Embedded-atom method: Derivation and application to impurities, surfaces, and other defects in metals // Phys. Rev. B. – 1986. – N. 29, Is. 12. DOI: <http://doi.org/10.1103/PhysRevB.29.6443>
4. Gerasimov R.M., Volegov P.S. Modeling of microvoids as a mechanism of microdamages: MD simulations // AIP Conference Proceedings. – 2018. – N. 2051. – 020096. DOI: 10.1063/1.5083339
5. Новиков И.И. Дефекты кристаллического строения металлов – Москва: «Металлургия», 1975. – 208 с.
6. Stukowski A., Albe K. Extracting dislocations and non-dislocation crystal defects from atomistic simulation data // Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. – 2010. – N. 18. – 085001. DOI: 10.1088/0965-0393/18/8/085001

РАСЧЕТ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ОДНОМЕРНЫХ ТЕЧЕНИЙ МЕЛКОЙ ВОДЫ

Герман В.А.

Научный руководитель: проф., д.ф.м.н. Бураго Н.Г.

Московский физико-технический институт

E-mail: german.vladislav@mail.ru

Рассматриваются пространственно одномерные течения мелкой воды. Пусть x - горизонтальная декартова координата, а z - вертикальная координата. Уравнения для течений мелкой воды выводятся из уравнений Навье-Стокса для несжимаемой вязкой жидкости в предположении, что глубина воды много меньше, чем размеры водоема ($h(x,t) \ll L$). В результате система уравнений имеет вид [1]:

$$\frac{d\eta}{dt} + h \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_\eta \frac{\partial \eta}{\partial x} \right)$$

$$\frac{du}{dt} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_u \frac{\partial u}{\partial x} \right)$$

где $d/dt = \partial/\partial t + u\partial/\partial x$ - материальная временная производная, $h = \eta - b$ это толщина слоя жидкости, $\eta(x,t)$ - уровень поверхности мелкой воды, $b(x,t)$ - уровень дна, $u(x,t)$ - скорость потока, g - ускорение свободного падения, k_η, k_u - коэффициенты диффузии.

Начальные условия приняты в виде:

$$t = 0, \quad x \in [0, L] : \eta = \eta^0(x), \quad u = u^0(x)$$

Граничные условия приняты в виде:

$$t \geq 0, \quad x = 0 \vee x = L : \eta = \eta^*(x,t) \vee k_\eta \frac{\partial \eta}{\partial x} = q_\eta^*(x,t)$$

$$t \geq 0, \quad x = 0 \vee x = L : u = u^*(x,t) \vee k_u \frac{\partial u}{\partial x} = q_u^*(x,t)$$

Метод решения. Численные решения получено с помощью схемы Лакса на равномерной регулярной сетке. Шаг по времени определяется условием устойчивости $\Delta t \leq \gamma \min(\Delta x) / \sqrt{u^2 + gh}$, где $0 < \gamma < 1$ - коэффициент запаса. Монотонность решения контролировалась по знаку второй производной от искомым функций на ребре. При смене знака в узлах ребра решение немедленно поправлялось по формуле $G_i := (G_i + (G_{i-1} + G_{i+1})/2)/2$, где G - искомая функция η или u . Для устранения нарушений законов сохранения из-за принятого способа монотонизации и из-за использования недивергентной формы балансных соотношений проводилась дополнительная коррекция решения на каждом шаге по времени. Например, пусть $M^{(n)}$ масса воды в области решения на старом временном слое. Ожидаемую массу $M^{(n+1)}$ на новом временном слое легко определить, учитывая отток/приток массы через границы. Пусть $\tilde{M}^{(n+1)}$ масса на новом временном слое, определенная по применяемой неконсервативной схеме. Для устранения ошибки по массе достаточно подправить глубину по формуле $\{h_i := h_i M^{(n+1)} / \tilde{M}^{(n+1)}\}_{i=1}^N$ во всех N узлах сетки. Коррекция импульса аналогична.

Результаты.

Задача 1. В задаче об обрушении водяной колонны бассейн $x \in [0, 100]$ разделен на две части с постоянным уровнем дна $b = 0$ в каждой из частей. Первая часть $x \in [0, 50]$ заполнена водой глубины $h_1 = 10$. Вторая часть $x \in [50, 100]$ - почти пустая, заполнена слоем малой глубины $h_2 = 1$. Между частями имеется перегородка. Ускорение силы тяжести $g = 9.81$. На левом и правом краях области решения при $x = 0$ и при $x = 100$ имеются высокие стенки, на которых $u = 0$ (условие непротекания). Начальная скорость жидкости

при $t=0$ равна нулю. Система находится в равновесии, пока перегородка на месте. В момент времени $t=0$ перегородка убирается, и вода стекает из первой части бассейна во вторую под действием силы тяжести (водяная колонна обрушивается). На рис. 1 для момента времени $t=4$ приведено сравнение решений для уровня свободной поверхности этой задачи, полученных различными методами в [2], с решением настоящей работы, полученным методом Лакса.

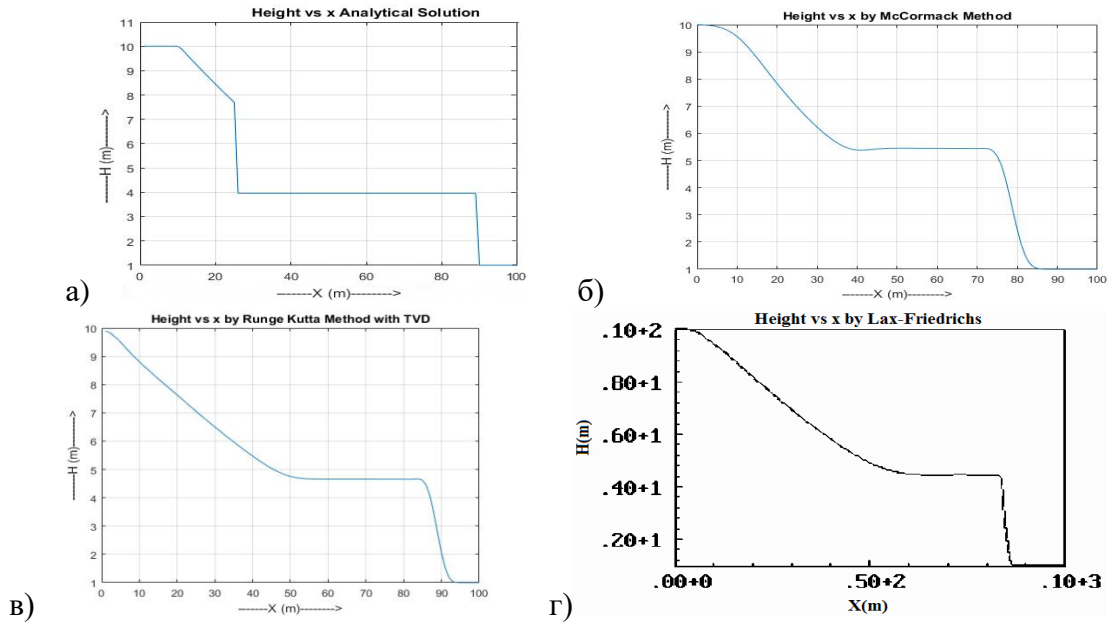


Рис. 1. а) Аналитическое решение[2]; б) решение методом Мак-Кормака [2]; в) решение методом Рунге-Кутты [2]; г) решение методом Лакса.

На рис. 2 приведено сравнение профилей скорости в момент времени $t=4$.

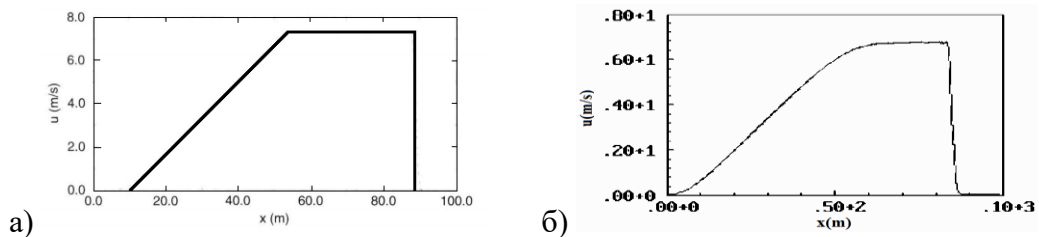


Рис. 2. а) Аналитическое решение [3]; б) решение методом Лакса

Задача 2. Рассматривается движение погруженных тел при упрощающем предположении о существовании плоскости тока $z=0$, делящей поток на верхнюю и нижнюю части, обтекающие соответственно верхнюю и нижнюю поверхности погруженного тела. Предполагается также, что разделяющая поверхность тока является горизонтальной плоскостью симметрии обтекаемого погруженного тела.

На рис. 3 приведены результаты расчетов задачи об обтекании тела треугольной формы при докритическом ($Fr < 1$) и сверхкритическом ($Fr > 1$) режимах, где число Фруда $Fr = |u|/c$, $c = \sqrt{gh}$ скорость распространения малых возмущений.

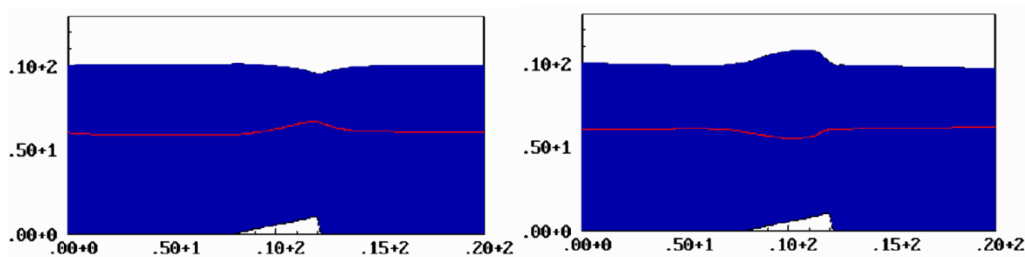


Рис. 3. Установившееся течение над треугольником:
слева - докритическое ($Fr=0.6$), справа – сверхкритическое ($Fr=1.6$)

На рис. 4 приведено сравнение численного решения [4] задачи об обтекании тела параболической формы, с решением настоящей работы.

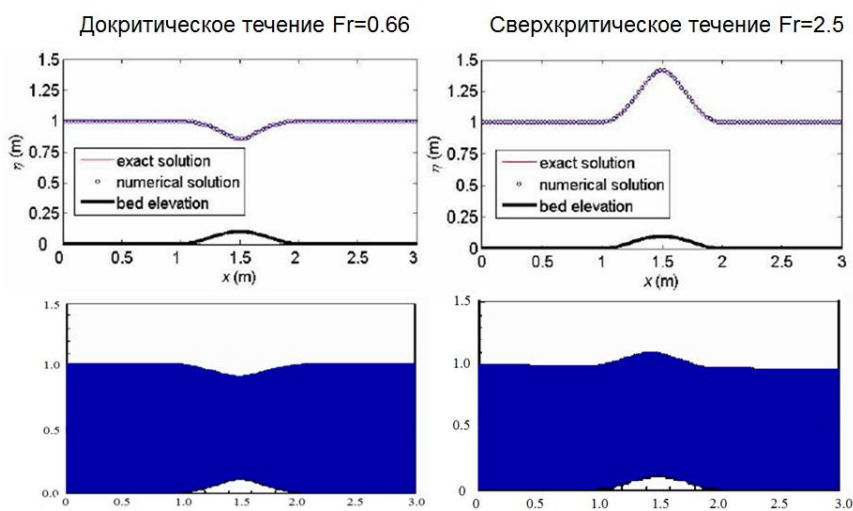


Рис. 4. Сравнение результатов расчета задачи об обтекании погруженных тел

Выводы. Показано, что простая схема Лакса, модифицированная процедурами контроля и коррекции возможных нарушений свойств монотонности и консервативности численных решений, позволяет получать решения нестационарных уравнений мелкой воды, которые хорошо согласуются с известными аналитическими и численными решениями других авторов.

Литература

1. Бреббиа К., Коннор Дж. Метод конечных элементов в механике жидкости. / Л.: Судостроение, 1979. – 204 с.
2. Bhatt. S. Investigation of Dam Break Problem through solution of 1D-Shallow Water equations using Fourth order Runge-Kutta Method, McCormack's Method and Gudonov's Method / Report of Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University at Buffalo, 2015. – 24 с.
3. S. Vincent, J.-P. Caltagirone, P. Bonneton (2001) Numerical modelling of bore propagation and run-up on sloping beaches using a MacCormack TVD scheme, Journal of Hydraulic Research, 39:1, 41-49, DOI: 10.1080/00221680109499801
4. Nor A. A., Lariyah M. S. Numerical Simulation on the Integrated Shallow Water Flow Model, 13th International Conference on Urban Drainage, Sarawak, Malaysia, 2014

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ SI-AU НАНОЧАСТИЦ

Гордеев И.С., Колотова Л.Н.

Московский физико-технический институт, г.Москва, Россия.

Объединенный Институт Высоких Температур РАН

E-mail: gordeevilu@gmail.com

В работе исследована кристаллизация жидкой системы Si-Au при быстром охлаждении. Для этого мы провели атомистическое моделирование с межатомным потенциалом формата ADP. Результаты моделирования показали, что на структуру Si-Au наночастиц влияют как концентрация золота, так и скорость охлаждения системы. Для исследуемой бинарной системы основным фактором, ограничивающим кристаллизацию, является диффузия атомов Au в жидком состоянии.

Введение: Кремниевые нанообъекты очень интересны для нанофотоники из-за уникальных оптических свойств, зависящих от атомарной структуры. Таким образом, изучение структурных особенностей этих частиц, таких как размер зерен и распределение атомов Au в кристаллических зернах и между ними представляет интерес. В работе изучено влияние скорости охлаждения на структуры наночастиц Si-Au (НЧ) для различных размеров НЧ и концентраций Au.

Цели исследования: Основной задачей данной работы являлось изучение процесса кристаллизации Si-Au НЧ и зависимость получаемых структур от концентрации золота и скорости охлаждения. Кроме того, было проанализировано распределение атомов Au в полученных структурах.

Методы: Моделирование проводилось в квазидвухмерном случае: один из размеров расчетной ячейки составлял около 10 нм, использовались периодические граничные условия. В свою очередь, это может привести к меньшим размерам зерен в моделировании по сравнению с экспериментом. Поэтому было проведено дополнительное одномерное моделирование для изучения зависимости размера зерна от концентрации Au в Si-Au НЧ. Расчеты использовался потенциал межатомного взаимодействия формата ADP[1].

Результаты: Проведено исследование процесса кристаллизации Si-Au НЧ. Получены зависимости получаемых структур от концентрации золота в частице и скорости охлаждения. Результаты моделирования показывают, что атомы золота пытаются покинуть зону кристаллизации путем атомной диффузии. Таким образом, этот эффект приводит к меньшему размеру зерна для больших концентраций Au.

Литература

1. S.V. Starikov et al. / Computational Materials Science 142 (2018) 303–311.

ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СЛУЧАЙНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ КРИСТАЛЛИТОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МАКСИМАЛЬНЫХ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ

Горденчук.В.Д.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
E-mail: ls34814@gmail.com

В ходе работы рассмотрены основы физики твердого тела, основные определения, такие как анизотропия физических свойств, текстура; поставлена и решена оптимизационная задача с использованием двухуровневой модели неупругого деформирования ГЦК поликристалла.

Как известно, большинство существующих материалов и конструкций эксплуатируются в области упругого нагружения, то есть, пластические деформации считаются недопустимыми. Поведение материала во многом зависит от его физико-механических свойств и от его эволюции внутренней структуры.

Для прикладных задач актуальным является увеличение прочностных характеристик существующих конструкций. Под прочностью будем понимать предел упругости материала. В рамках данной работы предполагается исследование влияние текстуры на упругие свойства и предел упругости материала. Это связано с тем, что необходимо получение такой текстуры, при которой материал будет как можно дольше оставаться в зоне упругих деформаций.

Текстура материала может порождать существенную анизотропию его свойств на макроуровне, которую необходимо учитывать при эксплуатации конструкций из данного материала.

В первую очередь, необходимо принимать во внимание влияние текстуры на такую характеристику материала, как предел упругости, предел текучести и предел прочности, поскольку именно эти характеристики наиболее существенны с точки зрения процессов обработки материалов и последующей эксплуатации изделий из них. Существуют опыты, показывающие существенные различия физических свойств одного и того же материала, но имеющего разные кристаллографические текстуры.

Кроме того, при формировании текстуры изменяются характеристики пластичности (относительное удлинение, относительное сужение) и вязкости (ударная вязкость). В качестве примера влияния текстуры на физические свойства можно привести различия в скорости распространения звука в среде, электрическом сопротивлении, сопротивлении коррозии, теплопроводности и магнитной проницаемости, измеренных в направлении прокатки и в поперечном направлении. В некоторых случаях применяются специальные технологии обработки металлов для создания в них оптимальной текстуры с целью улучшения свойств материалов [1]. Для описания процессов образования текстур в настоящее время имеют широкое применение математические модели, учитывающие механизмы поворотов (ротаций) кристаллических решеток материала при интенсивных неупругих деформациях [2].

Таким образом, целью работы является поиск оптимальных текстур для получения наибольших упругих деформаций для двухуровневой модели деформирования поликристалла с гранецентрированной кубической (ГЦК) решеткой.

Под кристаллографической текстурой подразумеваются наличие выделенных ориентации кристаллических решеток зерен в поликристалле. Появление текстуры вносит значительный вклад в анизотропию свойств материала, то есть различие значений этих свойств, измеренных в разных направлениях. Так, например, трансформаторные пластинки, вырезанные из одного листа, но в разных направлениях, будут иметь различную проводимость, что негативным образом скажется на работе трансформатора в целом.

Как правило, все зерна в поликристаллических заготовках в состоянии поставки ориентированы случайным равномерным образом. В этом случае говорят об отсутствии текстуры (рис. 1, а). Если практически все кристаллиты поликристалла имеют одну преимущественную ориентировку, то текстуру называют однокомпонентной (рис. 1, б).

Если же в изделии есть несколько групп кристаллитов, каждая из которых характеризуется своей ориентировкой, то текстуру называют многокомпонентной (рис. 1, в) [3].

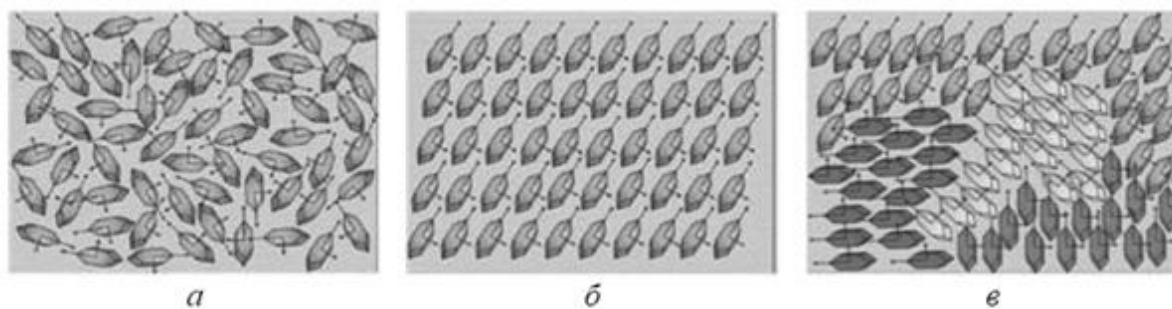


Рис. 1. Типы структуры поликристаллов: а - бестекстурное состояние; б - однокомпонентная; в - многокомпонентная текстура [3].

Для достижения поставленной цели в работе применяется двухуровневая упруговязкопластическая модель неупругого деформирования ГЦК поликристалла. Система уравнений, описывающая поведение материала на макроуровне (уровень образца), имеет следующий вид [2]:

$$\begin{cases} \Sigma^R = \Pi : (\mathbf{Z} - \mathbf{Z}^{in}), \\ \mathbf{Z} = \hat{\nabla} \mathbf{V}^T - \Omega, \\ \Omega = \langle \omega_{(i)} \rangle, \\ \Pi = \langle \mathbf{n}_{(i)} \rangle, \\ \mathbf{Z}^{in} = \langle \zeta_{(i)}^{in} \rangle, \\ \text{где } i = 1, \dots, N, \end{cases} \quad (1)$$

где $\langle \cdot \rangle$ – осреднение по представительному объему поликристалла, Σ – тензор напряжений Коши, Π – тензор модулей упругости, $\mathbf{Z}, \mathbf{Z}^{in}$ – мера скорости деформации на макроуровне, ее упругая и неупругая составляющая, ω – тензор ориентации кристаллической решетки кристаллита, $\mathbf{n}_{(i)}, \zeta_{(i)}^{in}, \omega_{(i)}$ – тензоры модулей упругости, напряжений, неупругой составляющей меры скорости деформации и спина i -го кристаллита. Величины \mathbf{Z}^{in} , Ω и Π определяются путем осреднения по всем элементам низшего масштабного уровня. Для определения неупругой составляющей меры скорости деформации используется следующее соотношение [2]:

$$\zeta^{in} = \sum_{k=1}^K \dot{\gamma}^{(k)} \mathbf{b}^{(k)} \mathbf{n}^{(k)}, \quad (2)$$

где $\dot{\gamma}^{(k)}$ – скорость сдвига по k -й системе скольжения, $\mathbf{n}^{(k)}$ и $\mathbf{b}^{(k)}$ – соответственно единичные векторы нормали и Бюргера для данной СС, K – число систем скольжения для рассматриваемого типа решетки.

Напряжения сдвигов, определяемые на каждой системе скольжения, записываются при помощи соотношения Коши:

$$\tau^{(k)} = \mathbf{b}^{(k)} \mathbf{n}^{(k)} : \sigma, \quad (3)$$

где σ – тензор Коши на мезоуровне; $\tau^{(k)}$ – сдвиговое напряжение для k -й системе скольжения.

Скорости сдвигов подчиняются упруговязкопластическому соотношению Хатчинсона:

$$\dot{\gamma}^{(k)} = \dot{\gamma}_0 \left| \frac{\tau^{(k)}}{\tau_c^{(k)}} \right|^m H(\tau^{(k)} - \tau_c^{(k)}), \quad (4)$$

где $\dot{\gamma}_0$ – характерная скорость сдвига; $\tau_c^{(k)}$ – критическое напряжение сдвига по k-й системе скольжения; $H(\cdot)$ – функция Хэвисайда; m – параметр материала; k изменяется $1, \dots, K$.

Учитывая вышеописанные соотношения, система уравнений для описания поведения материалов на уровне кристаллитов имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \boldsymbol{\sigma}^r = \mathbf{n} : (\boldsymbol{\zeta} - \boldsymbol{\zeta}^{in}), \\ \boldsymbol{\zeta}^{in} = \sum_{k=1}^K \dot{\gamma}^{(k)} \mathbf{b}^{(k)} \mathbf{n}^{(k)}, \\ \tau^{(k)} = \mathbf{b}^{(k)} \mathbf{n}^{(k)} : \boldsymbol{\sigma}, \\ \dot{\gamma}^{(k)} = \dot{\gamma}_0 \left| \frac{\tau^{(k)}}{\tau_c^{(k)}} \right|^m H(\tau^{(k)} - \tau_c^{(k)}), \\ \tau_c^{(k)} = const, \\ \boldsymbol{\zeta} = \mathbf{Z}, \\ \dot{\boldsymbol{\sigma}} \cdot \boldsymbol{\sigma}^T = \boldsymbol{\omega}, \end{array} \right. \quad (5)$$

где $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напряжений Коши; $(\cdot)^r$ – коротационная производная; \mathbf{n} – тензор упругих свойств мезоуровня; $\boldsymbol{\zeta}$ – тензор деформации скорости мезоуровня; \mathbf{D} – тензор деформации скорости макроуровня; $\boldsymbol{\omega}$ – тензор спина решетки.

Для нахождения оптимальной текстуры с целью получения наибольших упругих деформаций решалась задача оптимизации с использованием метода деформируемого многогранника (Нелдера – Мида) [4]. В ходе работы проведена серия численных экспериментов, имитирующих простой сдвиг представительного объема поликристалла меди, состоящего из 1000 зерен. Получена и проанализирована текстура, необходимая для получения наибольших упругих деформаций.

Литература

1. Захарченко И. Г., Волчок Н. А., Брюханов П. А., Совкова Т. С. Влияние комбинации прямой и поперечной прокатки на текстуру и анизотропию свойств листов α титанового сплава ТИ-3АЛ-1,5V // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – 2010. – №1. – С. 93-98.
2. Швейкин А.И., Ашихмин В.Н., Трусов П.В. О моделях ротации решетки при деформировании металлов // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2010. – № 4. – С. 111-127.
3. Лобанов М.Л., Юровских А.С., Кардонина Н.И., Русаков Г.М. Методы исследования текстур в материалах: учеб.-метод. пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та, 2014. – 115 с.
4. Nelder J.A., Mead R., A simplex for function minimization // Computer Journal. – 1965. – Vol. 7. – p. 308-313 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНЫХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ В ОБЛАСТИ БОЛЬШИХ ДОЛГОВЕЧНОСТЕЙ

Гулин В.В.¹, Никитин А.Д.^{1,2}

¹НИУ МАИ, ²ИАП РАН

E-mail: kornet104@gmail.com

В работе рассматривается проблема разрушения конструкционных материалов в области сверхмногоциклового усталости (СВМУ) применительно к конструкционным сталям. Проводится анализ существующих представлений, моделей и гипотез формирования специфической морфологии поверхности излома в окрестности дефекта микроструктуры (таких как неметаллического включения). Для описания геометрических особенностей формирования микрозернистой области используется механические представления о формировании микрочастиц, предложенной А.А. Шанявским. Проводится численное моделирование образца с включением, нагруженным в режиме СВМУ. Проводится анализ полей напряжений в окрестности дефекта и проводится сравнительный анализ с геометрией, наблюдаемой в эксперименте мелкозернистой области.

Известно, что под действием циклических нагрузок на поверхности металлических образцов формируются полосы скольжения. Интенсивность и характер данных линий в значительной степени зависит от величины внешней нагрузки. В случае высоких уровней напряжения образуются несколько серий полос скольжения в нескольких плоскостях, а по мере снижения величины внешних усилий наблюдается и уменьшение возможных плоскостей развития повреждаемости материала. Выделенные плоскости скольжения ассоциируются с кристаллографическими плоскостями металлов имеющих наиболее плотную упаковку, рис.1.

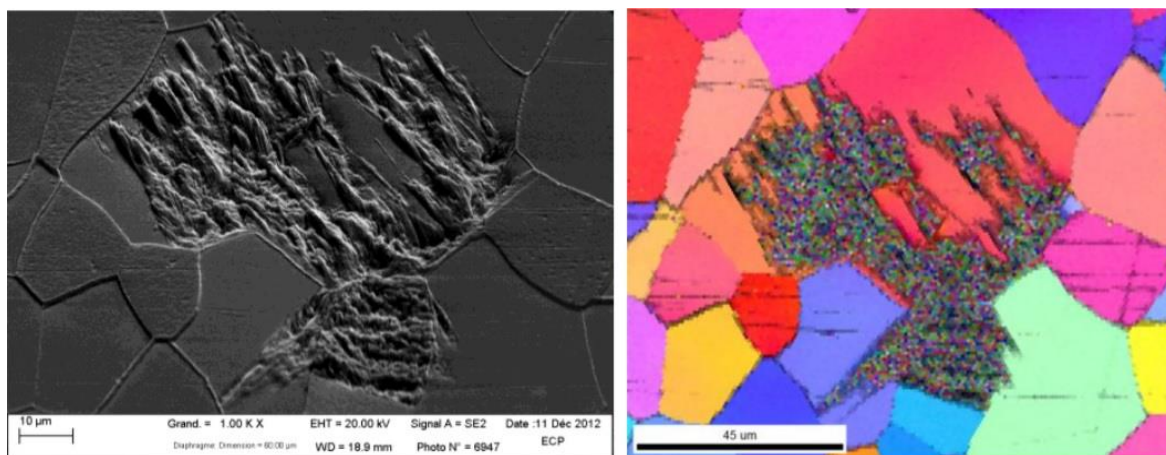


Рис.1: Полосы скольжения и результаты кристаллографического анализа

При малых амплитудах внешней нагрузки активируется лишь одна система скольжения кристалла и, следовательно, формируется одна группа полос скольжения. При возрастании внешней нагрузки в этот процесс вовлекается все большее количество систем скольжения и формируемый при этом характер повреждаемости носит более сложный характер. Исследования, проведенные ранее на конструкционных сталях, показали, что металлы могут разрушаться при нагрузках существенно ниже известного «предела усталости», определенного на базах испытаний $10^6 - 10^7$ циклов. При этом, наблюдаемое количество циклов до разрушения значительно возрастает. Более того, было показано, что усталостное разрушения материалов в области больших долговечностей ($10^8 - 10^{10}$ циклов), названной областью сверхмногоциклового усталости (СВМУ) [1], характеризуется принципиальной сменой механизма разрушения. Так, если для областей малоциклового и многоциклового усталости (МЦУ и МНЦУ соответственно) характерно поверхностное зарождение трещины в результате развития полос скольжения, то при СВМУ режиме трещины зарождаются в объеме материала от различного рода дефектов микроструктуры. При этом формируется

специфическая поверхность излома, называемая «рыбий глаз», рис.2 [3].

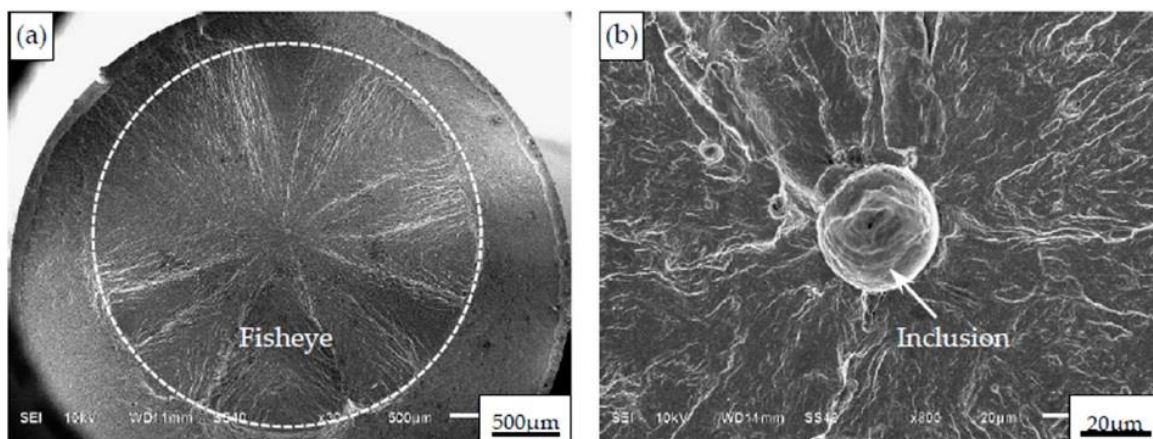


Рис.2: Внешний вид поверхности излома с трещиной типа «рыбий глаз» в стали.

В центре данной трещины находится дефект микроструктуры, рис.2б. Для сталей наиболее распространенным дефектом микроструктуры является неметаллическое включение. В настоящее время исследование процессов зарождения трещин при СВМУ нагружении является актуальной научной и технической проблемой. Это связано с рядом причин, среди которых стоит отметить: (1) оптимизация геометрии ответственных элементов конструкции с целью снижения веса изделий; (2) необходимость безопасного продления ресурса элементов конструкций и изделий; (3) повышение качества материалов и связанная с ним разработка новых технических условий изготовления и оценки их пригодности.

Все перечисленные причины подталкивают исследователей к изучению механизмов накопления повреждений в области СВМУ, а так же оценки влияния включений и их размеров на усталостную прочность и долговечность материалов. Применительно к области СВМУ было показано [1], что большую часть всей усталостной долговечности занимает процесс формирования трещиноподобного дефекта (до 99 % от общей усталостной долговечности). Применительно к сталям, для подавляющего большинства случаев разрушения, процесс постепенной деградации материала под действием циклических нагрузок в области СВМУ можно косвенно наблюдать на поверхности излома в виде мелкозернистой области, рис.3 [3]. Механизм ее формирования до настоящего момента не ясен и ассоциируется с различными физическими процессами, начиная от карбюризации материала в окрестности включения, заканчивая гипотезами полигонизации.

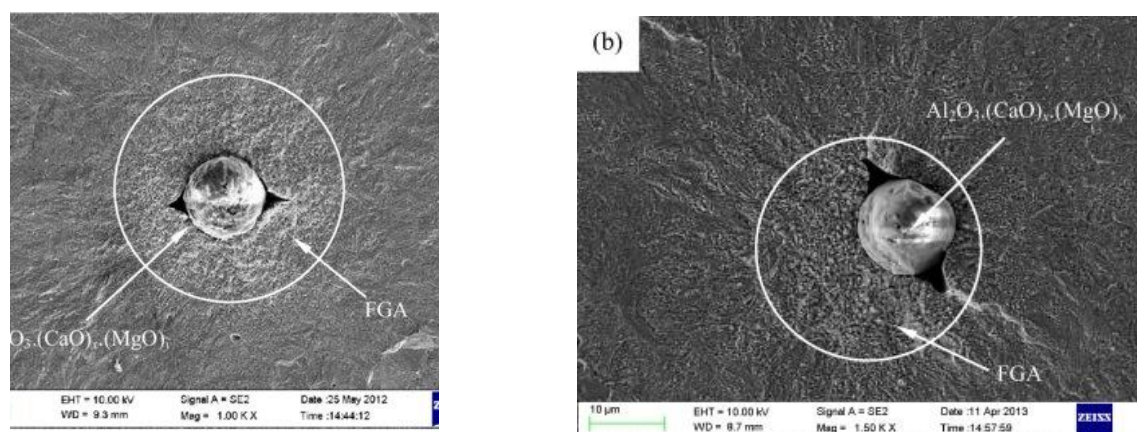


Рис.3: Примеры формирования мелкозернистой области в сталях при СВМУ нагружении.

В настоящей работе рассматривается механическая модель формирования мелкозернистой области. За основу взята гипотеза проф. А.Шанявского о наличии знакопеременных полей

напряжений в окрестности включения при циклическом нагружении [2]. Численно оцениваются поля напряжений, возникающие при СВМУ нагружения образца с заданным включением. Проводится сравнительный анализ численных результатов с наблюдаемыми в эксперименте областями деградации материала.

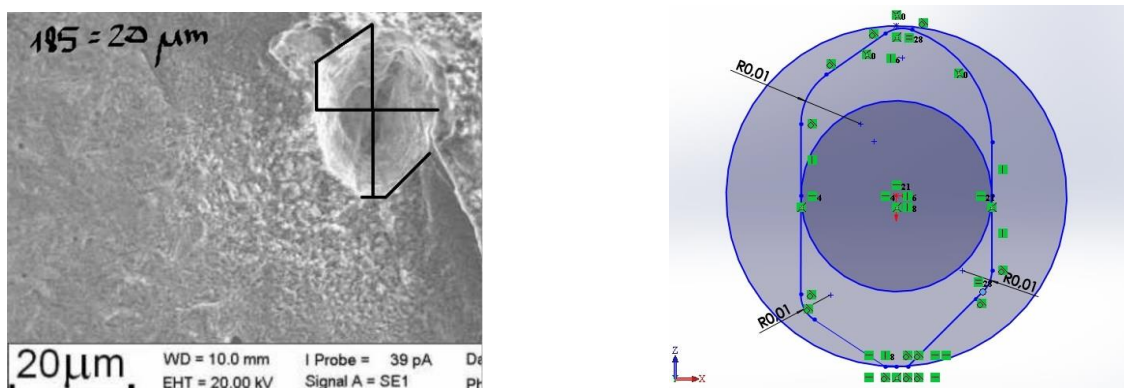


Рис.4: Внешний вид включения на поверхности излома образца из стали 100Cr6 в области СВМУ и ее математическая 3D модель.

Численно оцениваются поля напряжений, возникающие при СВМУ нагружения образца с заданным включением. Проводится сравнительный анализ численных результатов с наблюдаемыми в эксперименте областями деградации материала.

Литература

1. C.Bathias, P.C.Paris, Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice, Dekker, N Y, 2005, 328 p.
2. A.Shanyavskiy, Spherical particles formation under biaxial cyclic loading due to mesotunneling effect, Frattura ed Integrità Strutturale, 2015, Vol. 9(33) pp. 8-16
3. W. Li*, H. Deng and P. Liu, Interior Fracture Mechanism Analysis and Fatigue Life Prediction of Surface-Hardened Gear Steel under Axial Loading, Materials 2016, 9, 843, pp. 1-14

РАЗРАБОТКА КЭ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ПО АКТЮАТОРНОЙ СИСТЕМЕ НА ПКМ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Гуркина Е.Д., Шаталин А.А., Фисенкова Д.В.

Научный руководитель — к.т.н. Ягудин Т.Г.

МАИ НИУ, Москва

E-mail: edgurkina@yandex.ru

В последние десятилетие осуществляются исследования разного рода для создания малых космических аппаратов (КА), которые могли бы сравниться с классическими космическими аппаратами по функциональным возможностям, но при этом имели бы значительно меньшие массогабаритные характеристики. Одним из методов оценки свойств таких малых космических аппаратов может стать конечно-элементное (КЭ) моделирование конструкции целиком или отдельных функциональных частей КА, например КЭ моделирование теплофизических процессов, проходящих в актюаторных системах. В этой связи, работа по разработке КЭ модели распределения тепловых полей по актюаторной системе на ПКМ с эффектом памяти формы является актуальной.

Целью работы является КЭ моделирование распределения тепловых полей в актюаторной системе на основе ПКМ с эффектом памяти формы.

Задачи, решение, которых обеспечивает достижение поставленной цели: поиск, анализ научно-технической информации о внешних условиях в открытом космосе и работоспособности конструкции в заданных условиях; анализ научно-исследовательских работ по данной тематике; разработка КЭ модели распределения тепловых полей по пластине ПКМ в программном комплексе Ansys.

В результате работы сформулированы технические требования, исходные данные к моделированию, разработана КЭ модель распределения тепловых полей в актюаторной системе на основе ПКМ с эффектом памяти формы при воздействии температур в диапазоне от 100 до 130 °С, а также получены температурные градиенты при охлаждении и нагреве данной актюаторной системы в диапазоне температур от 20 до 150 °С.

Дальнейшая работа будет связана с усовершенствованием КЭ модели, для полноценного анализа всей конструкции малых космических аппаратов, анализом и аккумулярованием полученных данных, разработкой экспериментального образца для сверки результатов моделирования с реальными экспериментальными значениями.

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА ТЕРМОУПРУГОЙ ДИФФУЗИИ ДЛЯ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА И ЕЁ ПРИЛОЖЕНИЯ

Давыдов С.А.¹, Земсков А.В.^{1,2}

¹МАИ

²НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова

E-mail: xenon_93@inbox.ru

Представлены постановка и алгоритм численно-аналитического решения нестационарной задачи о распространении одномерных связанных термоупругодиффузионных возмущений в многокомпонентном изотропном полупространстве в следствии воздействия поверхностных и объёмных возмущений. Также рассматриваются некоторые вопросы о приложениях данной задачи.

Введение. Создание материалов с заранее запрограммированными свойствами и модификация уже имеющихся материалов под новые стандарты качества – одно из актуальных направлений разработок в области технологии обработки конструкционных материалов. Постановка и решение математических задач воздействия различных факторов на обрабатываемый материал и анализ получаемых результатов позволяют рассмотреть большее число вариантов воздействия при минимизации финансовых затрат в случае работы со сложными и высокотехнологичными процессами.

Существует целый ряд подходов к созданию математических моделей. Одним из перспективных, активно развивающихся, а также дающих возможность наиболее точно аналитически описать сложные динамические технологические процессы, является подход к построению моделей связанных полей. Примером такой модели является модель термомеханодиффузии, описывающей взаимодействия полей температуры, перемещения и концентраций [1–3].

Актуальность направления исследования подтверждается наличием множества работ различных научных центров, расположенных по всему миру. Большинство имеющихся на сегодняшний день работ посвящены решению статических, квазистатических и стационарных задач термомеханодиффузии. Однако наибольшие как интерес, так и трудность представляют нестационарные связанные задачи термомеханодиффузии. В этих работах решение сводится к преобразованию Лапласа по времени, обращение которого сопряжено с большими математическими трудностями. В связи с этим в большинстве работ для перехода к оригиналам искомым функциям применяются готовые пакеты вычислительной математики и механики или новые и сложные численные алгоритмы. Также стоит отметить, что в основном большинстве работ рассматриваются только однокомпонентные среды.

В данной работе рассматривается одномерная нестационарная задача термоупругой диффузии для однородного многокомпонентного полупространства. Для описания возмущений среды, распространяющихся с конечной скоростью, используется локально-равновесная модель связанной термоупругой диффузии, включающей уравнения движения упругой среды, теплопереноса и массопереноса [2–6]. Начальные условия приняты нулевыми.

Нестационарные задачи термомеханодиффузии (в отличие от стационарных) позволяют рассматривать быстрые, сложные и связанные динамические технологические процессы обработки металлов и сплавов, сопровождаемые взрывным ростом нагрузок и интенсивным теплопереносом. Примерами такого рода процессов могут являться различные импульсно-периодические способы поверхностной модификации поверхности как лазерная или электро-разрядная в жидкости. В дополнение к этому необходимо добавить, что процессами, которые могут быть наиболее полно описаны представленной математической моделью, являются технологические процессы ионной имплантации и диффузионной пайки. Эти технологии позволяют получать модифицированные покрытия, обладающие исключительными характеристиками, а также создавать множество различных стабильных твёрдых смесей и соединений, используемых в авиационной технике.

Методы. Рассматривается N -компонентное полупространство, ограниченное плоскостью $x_1 = 0$ ($Ox_1x_2x_3$ – прямоугольная Декартова система координат, а ось Ox_1 направлена вглубь

полупространства). Линейная локально-равновесная модель связанной термоупругой диффузии имеет вид (штрихи и точки – производные по безразмерным координате x и времени τ соответственно) [5–9]:

$$\begin{aligned} \ddot{u} &= u'' - b_u \vartheta' - \sum_{q=1}^N \alpha_q \eta'_q + F_1, \\ \dot{\vartheta} + \tau_T \ddot{\vartheta} &= \kappa \vartheta'' - b_T (\dot{u}' + \tau_T \ddot{u}') - \sum_{q=1}^N \beta_q (\dot{\eta}_q + \tau_T \ddot{\eta}_q) + F_2, \\ \dot{\eta}_q + \tau_q \ddot{\eta}_q &= \sum_{p=1}^N D_{qp} \eta''_p - \Lambda_q u''' - M_q \vartheta'' + F_{q+2} \quad (q = \overline{1, N}). \end{aligned} \quad (1)$$

Перемещение, тепловой и диффузионные потоки на границе $x_1 = 0$ заданы в виде:

$$u|_{x=0} = f_1(\tau), \quad \vartheta'|_{x=0} = f_2(\tau), \quad \left(\Lambda_q u'' + M_q \vartheta' - \sum_{p=1}^N D_{qp} \eta'_p \right) \Big|_{x=0} = f_{q+2}(\tau). \quad (2)$$

Также предполагается ограничение на бесконечности ($x \rightarrow \infty$):

$$u = O(1), \quad \vartheta' = O(1), \quad \left(\Lambda_q u'' + M_q \vartheta' - \sum_{p=1}^N D_{qp} \eta'_p \right) = O(1). \quad (3)$$

Начальные условия нулевые:

$$u|_{\tau=0} = \dot{u}|_{\tau=0} = \vartheta|_{\tau=0} = \dot{\vartheta}|_{\tau=0} = \eta_q|_{\tau=0} = \dot{\eta}_q|_{\tau=0} \equiv 0. \quad (4)$$

В формулах (1) – (4) и далее используются следующие безразмерные величины (если обозначение совпадает, то размерная величина обозначена звёздочкой):

$$\begin{aligned} x &= \frac{x_1}{L}, \quad \tau = \frac{Ct}{L}, \quad C^2 = \frac{C_{1111}}{\rho}, \quad u = \frac{u_1}{L}, \quad \eta_q = \frac{n^{(q)} - n_0^{(q)}}{n_0^{(q)}}, \quad \vartheta = \frac{T - T_0}{T_0}, \quad D_{qp} = \frac{D_{11}^{(qp)}}{CL}, \\ \alpha_q &= \frac{\alpha_{11}^{(q)} n_0^{(q)}}{C_{1111}}, \quad \Lambda_q = \frac{m^{(q)} D_{11}^{(qq)} \alpha_{11}^{(q)}}{\rho R T_0 C L}, \quad M_q = \frac{D_{11}^{(qq)} \ln[n_0^{(q)} \gamma^{(q)}]}{C L}, \quad \kappa = \frac{\kappa_{11}}{\rho c_0 L C}, \\ \beta_q &= \frac{n_0^{(q)} R \ln[n_0^{(q)} \gamma^{(q)}]}{m^{(q)} c_0}, \quad b_u = \frac{b_{11} T_0}{C_{1111}}, \quad b_T = \frac{b_{11}}{\rho c_0}, \quad \tau_T = \frac{C t_T}{L}, \quad \tau_q = \frac{C t^{(q)}}{L}, \\ f_1(\tau) &= \frac{f_1^*(t)}{L}, \quad f_2(\tau) = \frac{f_2^*(t) L}{T_0}, \quad f_{q+2}(\tau) = \frac{f_{q+2}^*(t)}{n_0^{(q)} C}, \\ F_1(x, \tau) &= \frac{F_1^*(x_1, t) L}{C^2}, \quad F_2(x, \tau) = \frac{F_2^*(x_1, t) L}{c_0 C T_0}, \quad F_{q+2}(x, \tau) = \frac{F_{q+2}^*(x_1, t) L}{n_0^{(q)} C}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь t – время; u_1 – компонента вектора перемещений; L – характеристический размер полупространства; q – номер компоненты среды; $n_0^{(q)}$ и $n^{(q)}$ – начальная и актуальная концентрации (массовые доли); t_T – время тепловой релаксации; $t^{(q)}$ – время диффузионной релаксации; C_{1111} – упругая постоянная; ρ – массовая плотность; b_{11} и $\alpha_{11}^{(q)}$ – коэффициенты, характеризующая объёмное расширение среды за счёт теплопереноса и массопереноса; $D_{11}^{(qp)}$ – коэффициент диффузии; $m^{(q)}$ – молярная масса; R – универсальная газовая постоянная; T_0 и T – начальная и актуальная температуры; κ_{11} – коэффициент теплопроводности; $\gamma^{(q)}$ – коэффициент активности; c_0 – удельная теплопроводность при начальной концентрации и деформации; $F_1^*(x_1, t)$ – массовая сила; $F_2^*(x_1, t)$ – объёмный приток тепла; $F_{q+2}^*(x_1, t)$ – объёмный приток массы.

Решение задачи (1) – (4) представляется в виде свёрток:

$$\begin{aligned}
u(x, \tau) &= \sum_{k=1}^{N+2} (\tilde{G}_{1k} ** F_k + G_{1k} * f_k), \\
\vartheta(x, \tau) &= \sum_{k=1}^{N+2} (\tilde{G}_{2k} ** F_k + G_{2k} * f_k), \\
\eta_q(x, \tau) &= \sum_{k=1}^{N+2} (\tilde{G}_{q+2,k} ** F_k + G_{q+2,k} * f_k).
\end{aligned} \tag{6}$$

Здесь $\tilde{G}_{ik} = \tilde{G}_{ik}(x, \xi, \tau)$ – объёмные, а $G_{ik} = G_{ik}(x, \tau)$ – поверхностные функции Грина ($i = \overline{1, N+2}$) задачи (1) – (4). Сами свёртки имеют вид:

$$\begin{aligned}
\tilde{G}_{ik} ** F_k &= \int_0^\tau dt \int_0^{+\infty} \tilde{G}_{ik}(x, \xi, \tau-t) F_k(\xi, t) d\xi, \\
G_{ik} * f_k &= \int_0^\tau G_{ik}(x, \tau-t) f_k(t) dt.
\end{aligned} \tag{7}$$

Для нахождения функций Грина используются преобразование Лапласа по времени и синус- и косинус-преобразование Фурье по координате. В результате преобразований задача сводится к системе линейных алгебраических уравнений, а её решение представляется в виде рациональных дробей относительно параметра преобразования Лапласа. Их оригиналы находятся с помощью известных теорем и таблиц операционного исчисления. Обращение синус-, косинус-преобразований в общем виде может проводиться численно с использованием таких известных подходов, как метод Филона или быстрого преобразования Фурье (FFT). Таким образом для этой задачи отпадает необходимость в разработке алгоритмов численного обращения преобразования Лапласа. Такой подход позволяет свести к минимуму использование численных алгоритмов и даёт возможность провести анализ полученных функций Грина [7–9].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-31-00437.

Литература

1. Еремеев В.С. Диффузия и напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Князева А.Г. Введение в термодинамику необратимых процессов. Лекции о моделях. Томск: Изд-во «Иван Федоров», 2014.
3. Aouadi M., Lazzari B., Nibbi R. A theory of thermoelasticity with diffusion under Green–Naghdi models // ZAMM J. Appl. Math. Mech. – 2014. – Vol. 94, Is. 10. – P. 837-852.
4. Давыдов С.А., Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Поверхностные функции Грина в нестационарных задачах термомехано-диффузии // Проблемы прочности и пластичности. – 2017. – Т. 79, № 1. – С. 38-47.
5. Davydov S.A., Zemskov A.V. Unsteady one-dimensional perturbations in multicomponent thermoelastic layer with cross-diffusion effect // J. Phys.: Conf. Ser. – 2018. – Vol. 1129. – 012009.
6. Davydov S.A., Vestyak A.V., Zemskov A.V. Propagation of one-dimensional thermoelastodiffusive perturbations in a multicomponent layer // J. Phys.: Conf. Ser. – 2019. – Vol. 1158. – 022034.
7. Давыдов С.А., Земсков А.В. Распространение одномерных связанных термоупругодиффузионных возмущений в изотропном полупространстве с учетом ненулевых времен релаксации // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2018. – Специальный выпуск 2. – С. 144-150.
8. Вестяк А.В., Давыдов С.А., Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Нестационарная одномерная задача термоупругой диффузии для однородных многокомпонентных сред с плоскими границами // Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки. – 2018. – Т. 160, Кн. 1. – С. 183-195.
9. Davydov S.A., Zemskov A.V., Akhmetova E.R. Thermoelastic diffusion multicomponent half-space under the effect of surface and bulk unsteady perturbations // Math. Comput. Appl. – 2019. – Vol. 24, Is. 1. – 26. – DOI:10.3390/mca24010026.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАРОЖДЕНИЯ ТРЕЩИНЫ В ПОРИСТОМ АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ АД1 С ГЕКСАГОНАЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ПОР

Данилушкин В.С., Абалихина О.В.

Самарский университет

E-mail: vladislavdan@bk.ru

Построены конечно-элементные модели пористого материала с гексагональным расположением пор и гексагональным расположением с порой в центре. Проведено конечно-элементное моделирование процесса зарождения и распространения трещины в вышеуказанных моделях. В результате компьютерного моделирования выявлены места зарождения трещин и определен характер их распространения.

Введение. Для снижения массы авиационной и космической техники необходимо использование легких и прочных материалов. На наш взгляд пористые материалы могут удовлетворять вышеуказанным требованиям. Однако для увеличения прочностных характеристик материала необходима микроструктура с оптимальным расположением пор. Оптимальное расположение пор в объеме материала может увеличить его удельные механические характеристики за счет того, что поры могут выполнять роль упрочняющей фазы, при этом имея малую плотность, по сравнению с основным материалом. Однако, при эксплуатации материал подвергается деформации и разрушению, при которых зарождаются и развиваются трещины. Благодаря тому, что поры могут выступать в роли стопора для распространения трещины и одновременно являются концентраторами напряжений, процесс зарождения и развития трещины в пористом материале отличается от процесса разрушения в компактном материале. Поэтому целью данной работы является конечно-элементное моделирование процесса зарождения трещины при различном характере расположения пор [1].

Методы. Для достижения цели исследования были построены конечно-элементные модели образцов пористого материала с гексагональным расположением пор и с гексагональным расположением пор с порой в центре. Конечно-элементный анализ проводился в программном продукте MSC.Nastran. В ходе проведения исследования было принято допущение о том, что материал является абсолютно упругим. Поэтому, конечно-элементным моделям задавались свойства алюминиевого сплава АД1 в наклепанном состоянии. Данные конечно-элементные модели подвергались одноосному растяжению. Конечно-элементные модели представлены на рис. 1.

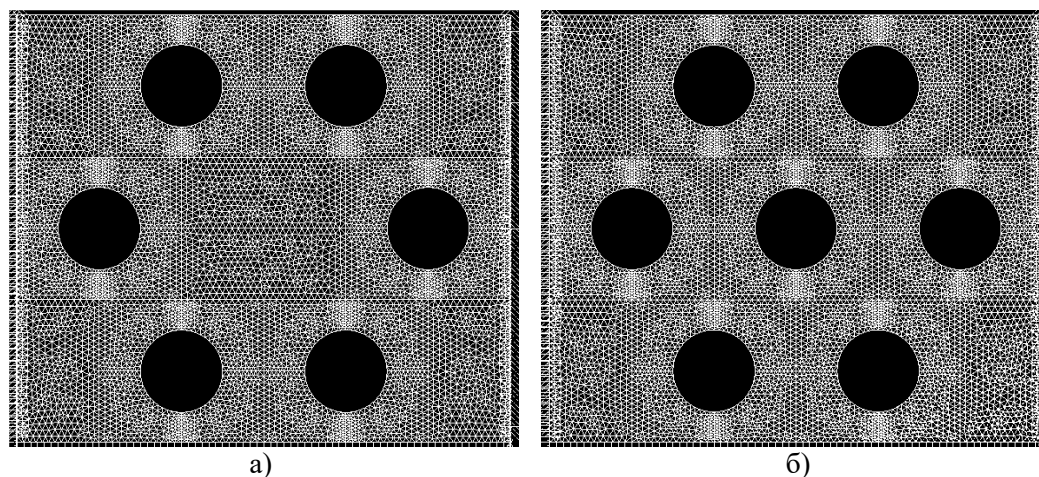


Рис. 1 – Конечно-элементная модель образца с гексагональным расположением пор (а) и с гексагональным расположением пор с порой в центре (б)

Моделирование процесса зарождения и развития трещины осуществлялось с помощью авторской программы-приложения (макроса) [2]. Данный макрос работает по следующему принципу: трещина зарождается в той области конечно-элементной модели образца

пористого материала, где максимальные напряжения превышают предел прочности заданного материала, и образовавшаяся трещина движется в том направлении, в котором необходимо затратить наименьшую работу на ее продвижение.

В ходе проведения исследования получены эпюры распределения напряжений и деформаций в конечно-элементных моделях образцов пористого материала с гексагональной пористой структурой и с гексагональной с порой в центре. При анализе полученных эпюр отмечено, что поля максимальных напряжений вокруг пор располагаются под углом 45° по отношению к оси растяжения, напряжения концентрируются на вертикальных полюсах крайних пор (рис. 2). В случае рассматриваемых пористых структур, очагами зарождения трещин являются поры, которые располагаются ближе к краю образца, и направление движения трещин ориентированно к краю образца, а не в объем материала.

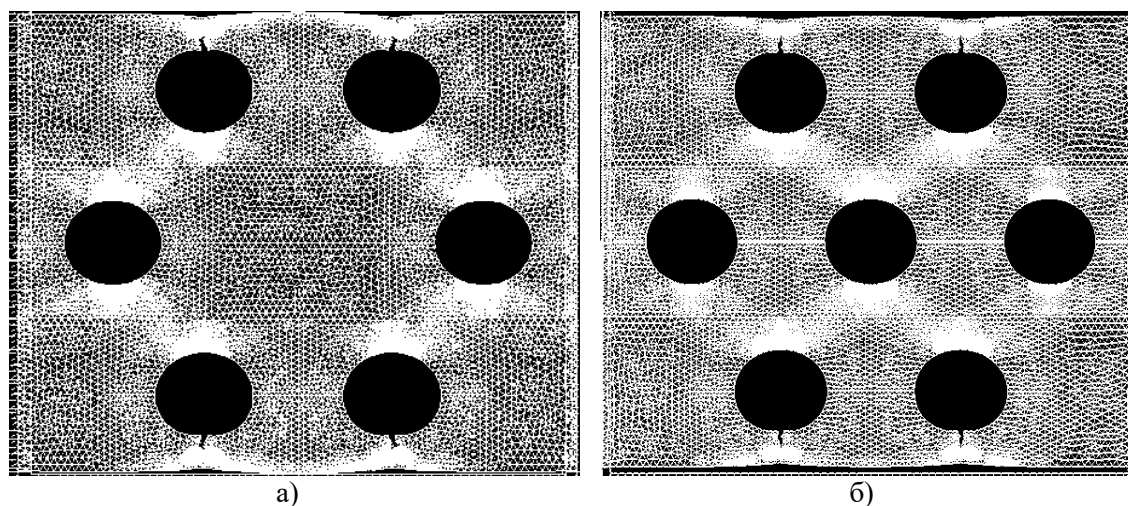


Рис. 2 – Эпюры распределения напряжений и деформации в конечно-элементной модели на последнем этапе задачи: а) модель с гексагональным расположением пор; б) модель с гексагональным расположением с порой в центре

Литература

1. Levandovskiy A.N., Melnikov B.E., Shamkin A.A. Инженерно-строительный журнал. 2017. № 1 (69). С. 3-22.
2. Voronin S.V., Yushin V.D., Bunova G.Z. Computer-aided study of materials' microstructure influence on cracks' propagation pattern in brittle anisotropic bodies // Modern Applied Science 2015. Vol. 9. № 3. P. 51-58

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О РАСТЯЖЕНИИ ДВУХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ ИЗ КУБИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ С АУКСЕТИЧЕСКИМ СЛОЕМ

Демин А.И., Городцов В.А., Лисовенко Д.С.

ИПМех РАН

E-mail: deminaliv@gmail.com

Представлены результаты численных расчетов эффективных упругих характеристик (коэффициента Пуассона и модуля Юнга) при растяжении слоистых пластин, состоящих из ауксетиков (материалов с отрицательным коэффициентом Пуассона) и неауксетиков. Проведен сравнительный анализ полученных результатов с результатами, полученными в рамках теории упругости анизотропного тела.

Введение. Ауксетиками называют материалы с отрицательным коэффициентом Пуассона. В отличие от традиционных материалов, при продольном растяжении ауксетики расширяются в поперечном направлении. Широкое изучение ауксетиков началось после экспериментального подтверждения отрицательного коэффициента Пуассона у металлических и полимерных пен в 1987 году [1].

В настоящее время выявлено более 300 кристаллических ауксетиков с кубической анизотропией [2]. Исследование механических свойств нано/микротрубок из кубических кристаллов [2] показало, что материалы с подобной структурой могут обладать отрицательным коэффициентом Пуассона, даже если исходные кристаллы не являются ауксетиками.

В [3-14] изучено влияние ауксетичности на механические свойства слоистых композитов. В случае изотропных материалов наличие ауксетического слоя в двухслойной пластине при растяжении приводит к тому, что наблюдается нарушение прямого и обратного правил смесей [3,6-8]. В [12,13] было рассмотрено растяжение двухслойных и трехслойных композитов, состоящих из кубических кристаллов. Анализ эффективных упругих характеристик [12] показал, что модуль Юнга может превышать модули Юнга обоих исходных кубических кристаллов.

Методы. В нашей работе задача растяжения двухслойной пластины решалась методом конечных элементов. Была создана трехмерная модель слоистой квадратной пластинки (10×10 см) с жестким контактом материалов в двух слоях (Рис.1). Суммарная толщина пластины равна 3 см. На поверхности раздела материалов предполагалось отсутствие перемещений по оси z . Задавалось перемещение торцевой поверхности, перпендикулярной оси x , вдоль оси x на 0,001 м, что соответствует деформации $\varepsilon_x = 0.01$. При проведении численных расчетов определялось значение нормальных напряжений для каждого материала σ_x^1 и σ_x^2 . Эффективный модуль Юнга и эффективные коэффициенты Пуассона ν_{xy}^{eff} , ν_{xz}^{1eff} , ν_{xz}^{2eff} двухслойной пластинки вычислялись по следующим формулам

$$E_{eff} = \frac{1}{\varepsilon_x} \left(\frac{h_1}{h_1 + h_2} \sigma_x^1 + \frac{h_2}{h_1 + h_2} \sigma_x^2 \right),$$
$$\nu_{xy}^{1eff} = -\frac{\varepsilon_y^1}{\varepsilon_x^1} = -\frac{\varepsilon_y^2}{\varepsilon_x^2} = \nu_{xy}^{2eff}, \quad \nu_{xz}^{1eff} = -\frac{\varepsilon_z^1}{\varepsilon_x^1}, \quad \nu_{xz}^{2eff} = -\frac{\varepsilon_z^2}{\varepsilon_x^2}.$$

Для этого определялись значения деформации ε_y на контактной поверхности и деформации ε_z^k для каждого слоя. Эффективный коэффициент Пуассона ν_{xz}^{eff} рассчитывался через эффективную деформацию пластины, которая, в свою очередь определялась как отношение взаимного перемещения по оси z соответствующих поверхностей слоистой пластинки ($u_z^{z=0}$ и $u_z^{z=h}$) к толщине пластинки h :

$$\nu_{xz}^{eff} = \frac{(u_z^{z=0} - u_z^{z=h}) / h}{\varepsilon_x}.$$

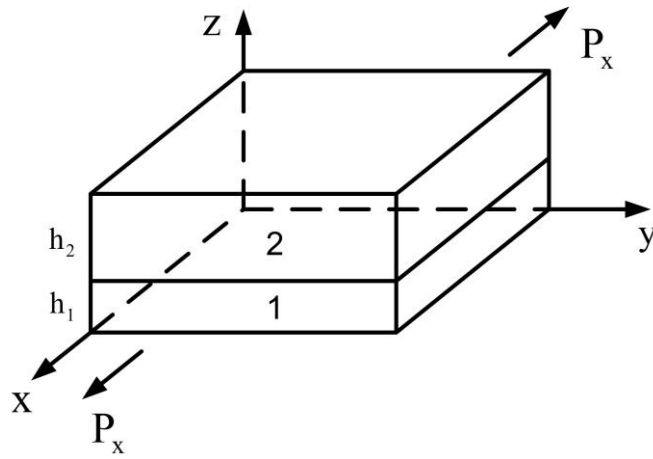


Рис.1. Растяжение двухслойной пластины, состоящей из двух слоев 1 и 2 толщиной h_1 и h_2 .

Результаты. В результате численных расчетов были получены значения эффективных упругих коэффициентов для двухслойной пластины с различным соотношением слоев по толщине для следующих материалов: TmSe-Ag, TmSe-Al, TmSe-W, TmSe-NA, $\text{Sm}_{0.65}\text{La}_{0.35}\text{S-Ag}$, $\text{Sm}_{0.65}\text{La}_{0.35}\text{S-Th}$, $\text{Sm}_{0.65}\text{La}_{0.35}\text{S-ZnS}$. Был проведен сравнительный анализ полученных результатов с результатами, представленными в [12] (Рис.2, 3). На Рис.2 и Рис.3 точками и треугольниками обозначены значения, полученные с помощью метода конечных элементов, а сплошной, штриховой, штрихпунктирной линиями – зависимости, построенные на основе результатов по формулам из [12].

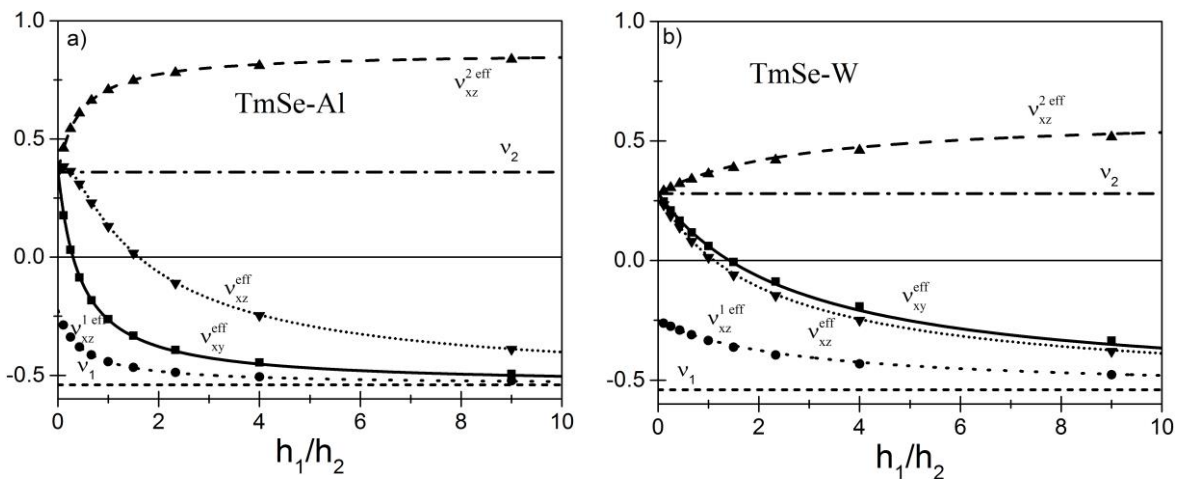


Рис.2. Сравнение результатов, полученных с помощью метода конечных элементов и в рамках теории упругости анизотропного тела, для эффективного коэффициента Пуассона слоистых пластинок из а) TmSe-Al и б) TmSe-W. Где $\nu = -0.54$, $E = 115$ ГПа для TmSe, ГПа $\nu = 0.36$, $E = 62.5$ для Al, $\nu = 0.28$, $E = 408$ ГПа для W.

Расхождение численных и аналитических расчетов составило не более 1,3% для эффективного модуля Юнга и не более 10% для эффективного коэффициента Пуассона. Таким образом, выполненные расчеты удовлетворительно соответствуют результатам по формулам работы [12]. Полученное соответствие позволяет использовать описанный в нашей работе метод для численной оценки механических свойств и напряженно-деформированного состояния слоистых пластин, содержащих кристаллические ауксетики.

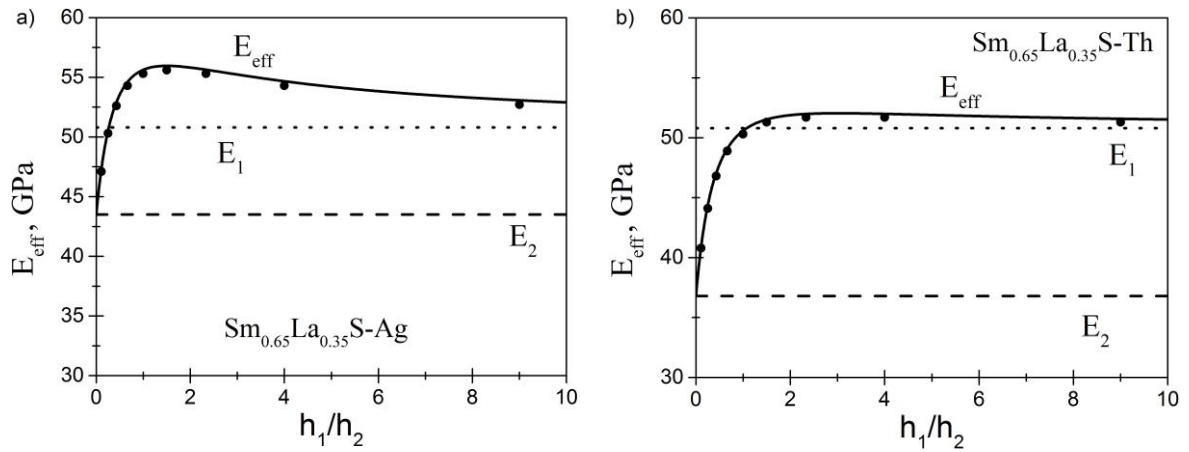


Рис.3. Сравнение результатов, полученных с помощью метода конечных элементов и в рамках теории упругости анизотропного тела, для эффективного модуля Юнга слоистых пластинок из а) $\text{Sm}_{0.65}\text{La}_{0.35}\text{S-Ag}$ и б) $\text{Sm}_{0.65}\text{La}_{0.35}\text{S-Th}$. Где $\nu = -0.34$, $E = 50.8$ ГПа для $\text{Sm}_{0.65}\text{La}_{0.35}\text{S}$, $\nu = 0.43$, $E = 43.5$ ГПа для Ag, $\nu = 0.39$, $E = 43.5$ ГПа для Th.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 18-19-00736 (ДСЛ и ВАГ).

Литература:

1. R.S. Lakes. *Science* **235**, 1038 (1987).
2. R.V. Goldstein, V.A. Gorodtsov, D.S. Lisovenko, M.A. Volkov. *Phys. Mesomech.* **17**, 97 (2014).
3. T.-C. Lim. *Phys. Status Solidi B.* **244**, 910 (2007). DOI: 10.1002/pssb.200572710
4. C. Kocer, D.R. McKenzie, M.M. Bilek. *Mater. Sci. Eng. A.* 505, 111 (2009).
5. G.T. Chirima, K.M. Zied, N. Ravirala, K.L. Alderson, A. Alderson. *Phys. Status Solidi B* **246**, 2072 (2009).
6. T.-C. Lim. *Eur. J. Mech. A Solids* **28**, 752 (2009).
7. T.-C. Lim. *J. Eng. Mech.* **136**, 1176 (2010).
8. T.-C. Lim, U.R. Acharya. *Phys. Status Solidi B* **248**, 60 (2011).
9. T. Streck, H. Jopek, B.T. Maruszewski, M. Nienartowicz. *Phys. Status Solidi B* **251**, 354 (2014).
10. T. Streck, H. Jopek, E. Idczak. *Phys. Status Solidi B* **253**, 1387 (2016).
11. T. Streck, H. Jopek. *Phys. Status Solidi B* **249**, 1359 (2012).
12. R.V. Goldstein, V.A. Gorodtsov, D.S. Lisovenko. *Eur. J. Mech. A Solids* **63**, 122 (2017).
13. V.A. Gorodtsov, D.S. Lisovenko, T.-C. Lim. *Composite Structure* **194**, 643 (2018).
14. R.V. Goldstein, V.A. Gorodtsov, D.S. Lisovenko, M.A. Volkov. *Phys. Status Solidi B* **254**, 1600815 (2017).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОВОЛОЧНЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ

Десюкевич К.Ю., Шипунов В.В.

Научный руководитель — д.т.н. Давыдов Д.П.

Самарский университет, Самара

E-mail: kirillmc74@mail.ru

В работе [1] предложена оригинальная методика определения механических свойств проволоки, используемой при изготовлении материала МР. Знание этих свойств позволит изучить процессы навивки и прессования материала МР на принципиально новом уровне с применением современных средств компьютерного математического моделирования, таких как ANSYS и LS-DYNA. Для реализации данного метода авторами настоящей работы был разработан уникальный датчик [2], на который подана заявка на регистрацию изобретения.

С целью отработки методики были проведены исследования механических характеристик холоднотянутых проволочных образцов диаметром 0,2 мм из хромоникелевой стали 12Х18Н10Т ГОСТ 18143-72 при одноосном растяжении. Испытания проводились с использованием разрывной машины Galdabini Quasar 25. Для закрепления указанных образцов в машине были спроектированы зажимы [3], обеспечивающие одноосное напряжённое состояние в проволоке и исключающие концентрацию напряжений. Регистрация усилия осуществлялась с использованием штатного тензодатчика установки, а регистрация деформации проволочного образца при помощи указанного выше оптоэлектронного датчика [2].

Результатом проведённых экспериментов являются численные значения удлинения проволочных образцов в зависимости от приложенной к ним нагрузки.

По известным геометрическим параметрам поперечного сечения и базовой длины образцов найдена зависимость напряжения в проволоке от её деформации. Обработка экспериментальных данных установила, что для образцов из материала 12Х18Н10Т средние значения модуля упругости – $E=2,07 \cdot 10^{11}$ Па, предела прочности $\sigma_B=1368$ МПа и относительного удлинения образца при разрыве $\delta=0,193\%$.

Сравнение экспериментальных данных со справочными показало хорошее согласование. Отклонение экспериментальных данных от справочных не превышает 4,5%.

По результатам исследования сделано заключение о корректности предложенной методики определения механических характеристик проволочных образцов при одноосном растяжении.

Литература

1. Десюкевич, К.Ю., Шипунов, В.В. Разработка методики и датчика измерения деформаций проволочной основы материала МР при испытаниях на разрыв // Г12 Гагаринские чтения – 2018: XLIV Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов. Том 3: М.: Моск. авиационный ин-т (национальный исследовательский университет), 2018. 453 с.
2. Десюкевич, К.Ю., Шипунов, В.В. Методика измерения деформаций проволочной основы материала МР при испытаниях на разрыв // Молодежь. Техника. Космос: труды X Общероссийской молодежной науч.-техн. конф. Т.1/ Балт. гос. техн. ун-т. – СПб.; 2018. – 467 с.
3. Десюкевич, К.Ю., Шипунов, В.В. Проектирование установки для исследований механических свойств проволочной основы материала МР // Студенческая научно-техническая конференция «Лукачёвские чтения – 2017». – Самарский университет, 2017. – 76с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ОБРАЗЦОВ УГЛЕПЛАСТИКА

Добрянский В.Н.

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Соляев Ю.О.

МАИ, Москва

E-mail: aprilvasya@gmail.com

Склонность к расслоению является одной из основных конструктивных проблем для многих современных многослойных композитных конструкций. Знание характеристик трещиностойкости многослойного композитного материала необходимо для выбора материалов, проектирования и проведения прочностных расчетов разрабатываемых новых конструкций.

В данной работе рассмотрена современная методика экспериментального определения механических свойств волокнистых полимерных композиционных материалов на основе углеродных волокон, включающая исследование межслоевых трещиностойкостей GIC и GPC, межслоевой прочности, а также влияния температуры на межслоевую прочность, механических свойств композиционных материалов при растяжении. Приводится сравнение значений межслоевых трещиностойкостей GIC и GPC, а также механических свойств при растяжении, межслоевой прочности в зависимости от плотности укладки армирующего наполнителя.

Рассмотрена методика определения величины удельной работы расслоения в условиях отрыва GIC по методу DCB (double cantilever beam – двухконсольная балка) и в условиях поперечного сдвига GPC по методу ENF (end notch flexure – изгиб образца с краевым расслоением). Описывается методика подготовки образцов, методика проведения испытаний, обработки результатов. Описаны трудности, возникающие в процессе опытов, даны рекомендации по их решению. Приведены результаты испытаний образцов полимерных композиционных материалов с углеродным армирующим наполнителем с укладкой 0-900. Испытывались образцы с различной поверхностной плотностью армирующего наполнителя. Механические испытания проводились при комнатной температуре на испытательной установке Instron 5969 с программным обеспечением Bluehill 3.

Было проведено компьютерное моделирование процесса раскрытия и роста трещины в программном комплексе Simulia ABAQUS. Получено хорошее соответствие экспериментальных данных и компьютерного моделирования.

Рассмотренные методы расчета позволяют оценивать прочность композитных элементов конструкций и, в том числе, развитие межслоевых дефектов при статических и ресурсных нагрузках на основании результатов испытаний стандартных экспериментальных образцов. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-31-20043.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ЗАРОЖДЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН ПРИ СВМУ НАГРУЖЕНИИ

Дубинец А.О.

Научный руководитель — доцент, к.т.н. Никитин А.Д.

МАИ, Москва

E-mail: anisia.dubinets@icloud.com

Длительная эксплуатация материалов подверженных циклическому нагружению требует оценки их долговечности, что приводит к необходимости введения некоторого критерия усталостного разрушения. Под действием переменных напряжений в материале постепенно накапливаются повреждения, которые приводят к изменению механических свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению, что называют усталостью. В последние десятилетия усталостное поведение конструкционных материалов в режиме сверхмногоциклового усталости (СВМУ) стало важным предметом исследования.

При данном режиме нагружения на зарождение и развитие усталостных трещин существенно влияют дефекты внутреннего строения материала (различие формы, размеров, ориентации соседних зёрен металла, внутренние трещины, наличие включений — шлаков, примесей), дефекты обработки поверхности (следы от резца, царапины, коррозия и т. д.).

На поверхности усталостного излома можно выделить характерные две или три зоны разрушения. В окрестности области зарождения, усталостная трещина распространяется с относительно высокой скоростью, в этом случае поверхность имеет малую шероховатость и напоминает полированную. Вторая зона является более шероховатой, поэтому поверхность разрушения имеет нерегулярный характер. Окончательное разрушение происходит в третьей зоне, называемой зоной долома, металл разрушается в последнем полуцикле нагружения. В этой зоне характерен вязкий тип разрушения.

Преимущественное развитие усталостных трещин в поверхностных слоях, обусловлено более ранним по сравнению с остальным объемом металла повреждением поверхностных слоев из-за более раннего накопления в этих слоях критической плотности пластических дефектов. Поскольку процесс усталости во всем объеме протекает неоднородно, то для изучения изменения свойств в процессе циклического нагружения необходимы характеристики, которые позволяли бы судить о процессах, происходящих в полном объеме металла.

В настоящей работе проводится анализ поверхностей излома усталостных образцов разрушенных в области сверхмногоциклового усталости и выявление очагов усталостных трещин. В качестве рабочей гипотезы предполагается, что наблюдаемая усталостная долговечность материала может зависеть от положения области зарождения трещины относительно центра образца. Для каждого разрушенного образца составляется таблица результатов измерения удаленности очага трещины от центра образца. Проводится анализ полученных данных и выявление закономерностей. С целью объяснения полученных экспериментальных результатов дополнительно проводится измерение размера поврежденной области и определяются параметры напряженно деформированного состояния в окрестности области зарождения. Полученные расчетные и экспериментальные данные используются для описания распределения усталостной долговечности образцов в зависимости от положения очага трещины относительно центра образца.

Известно, что вблизи концентратора, например отверстия, напряжения значительно превышают напряжения на бесконечности, причем это увеличение напряжений имеет резко выраженный локальный характер и быстро убывает с расстоянием (так называемая концентрация напряжений у дефекта). Если размер дефекта превышает критический размер, трещина может зародиться и имеет тенденцию постепенно расти, с увеличением количества циклов. Исследование пространственных закономерностей зарождения усталостных трещин при СВМУ нагружении является важной темой для обеспечения долгосрочной безопасности реальных конструкций в различных областях промышленности.

ЗАДАЧА ДРОБЛЕНИЯ ОПАСНОГО АСТЕРОИДА

Екимовская В.А.

Мытищинский филиал МГСУ (НИУ)

E-mail: lera.ek00@mail.ru

Изучается проблема целенаправленного дробления опасного космического объекта для отвода траектории движения фрагментов от Земли. Новый подход к решению задачи заключается в многократном целенаправленном разрушении не только объекта, но и образовавшихся вторичных фрагментов.

Введение. При защите Земли от опасных астероидов часто предлагают применить схему искусственного разрушения космического объекта. При реализации такой схемы надо учитывать, что центр масс исходного тела и множества образовавшихся взрывных фрагментов будет продолжать двигаться по прежней траектории. В работе показано, как можно практически реализовать разрушение опасного астероида для защиты Земли от столкновения. В частности, решена задача о фрагментации исходного объекта на две части, безразлично, одинаковые или разные по массе и размерам. Проблема защиты Земли от опасных астероидов тесно связана с антропогенным засорением околоземного космического пространства фрагментами космического мусора [1]. Общими чертами этих двух проблем являются большие относительные скорости столкновения объектов. Даже при сравнительно небольших размерах космического тела, например, астероида, порядка ста метров, последствия его столкновения с Землёй будут катастрофическими [2]. Обе проблемы начали изучаться как в организациях науки и промышленности, так и в военных организациях более двадцати лет назад [3].

Методы. Для однократного дробления тела задача решается в один этап определением угла отклонения траектории фрагмента в сторону от Земли. В результате такого дробления образуются два фрагмента, траектории которых не пересекаются с Землёй. В этой статье изучен вопрос трёхкратного разрушения объекта. Решение задачи состоит из двух частей. Первое дробление проводится на два равных фрагмента, но, в отличие от первой задачи, траектории движения этих фрагментов пересекают Землю, то есть образовавшиеся новые объекты продолжают оставаться опасными для нашей планеты. Целью первого дробления объекта на два равных фрагмента является отклонение траектории новых тел на сравнительно небольшой угол α . На рис.1 показана геометрическая часть задачи дробления объекта. Предполагается, что опасный объект движется к центру Земли. Задан угол α первого отклонения фрагментов от центральной оси, который предполагается меньше угла касательной, то есть $\alpha < \alpha_{\max}$. Требуется найти диаметр $2r = CD$ сечения сферы, в плоскости которой движется новый образовавшийся фрагмент. Второй фрагмент движется в симметричном направлении. Задача решается методом планиметрии с помощью теоремы о секущих к окружности. Точка S дробления объекта предполагается известной и характеризуется расстоянием L от поверхности Земли. Для обобщения результатов в рассмотрение введено относительное безразмерное удаление $b = L/R_3$ объекта от поверхности Земли. Применив теорему о касательных к окружности, а потом теорему косинусов к треугольнику SOC было найдено расстояние S от точки дробления до поверхности Земли $SC = (L + R_3) \cos \alpha - \sqrt{(L + R_3)^2 \cos^2 \alpha - (L^2 + 2LR_3)}$. Затем была получена формула для расчёта радиуса r сечения сферы, в плоскости которой движется новый образовавшийся фрагмент:

$$r(\alpha) = \frac{L^2 + 2LR_3 - (L + R_3)^2 \cos^2 \alpha + (L + R_3) \cos \alpha \sqrt{(L + R_3)^2 \cos^2 \alpha - (L^2 + 2LR_3)}}{(L + R_3) \cos \alpha - \sqrt{(L + R_3)^2 \cos^2 \alpha - (L^2 + 2LR_3)}}$$

$$f(\alpha) = \alpha + \arcsin \left[1 + \frac{b \left[(b+1) \cos \alpha - \sqrt{(b+1)^2 \cos^2 \alpha - (b^2 + 2b)} \right]}{b^2 + 2b - (b+1)^2 \cos^2 \alpha + (b+1) \cos \alpha \sqrt{(b+1)^2 \cos^2 \alpha - (b^2 + 2b)}} \right]^{-1}$$

Анализ полученных данных был проведён численными и графическими методами с помощью программы MathCAD.

Графики двух углов дробления фрагментов представлены на третьей части рис.1. Все углы выражены в радианах. При расчётах предполагалось, что дробление опасного объекта происходит на геостационарной орбите, то есть на удалении приблизительно шесть радиусов Земли от её поверхности. Диагональ прямоугольника – это угол α . Дуга – это угол $\beta(\alpha)$. Целевая функция $f(\alpha) = \alpha + \beta(\alpha)$ не имеет локальных минимумов, напротив, имеет локальный максимум, потому что первое слагаемое α до точки пересечения графиков растёт очень быстро по прямой линии графика. Это означает, что с геометрической точки зрения для минимизации углов отклонения выгодно проводить однократное деление опасного объекта, а не последовательные многократные целенаправленные дробления. Однако энергетическая эффективность такой схемы фрагментации опасного объекта не является следствием геометрической минимизации, потому что в процессе дробления изменяются скорости движения образовавшихся новых фрагментов. Результаты решения геометрической задачи целенаправленного дробления опасного объекта стали исходными данными для дальнейшего решения энергетической задачи.

Выводы.

1. Решена геометрическая задача о последовательной фрагментации опасного для Земли объекта, определены необходимые углы отклонения фрагментов.
2. С геометрической точки зрения доказана рациональность однократного целенаправленного дробления опасного объекта, при которой необходимый суммарный угол отклонения фрагментов будет минимальным.
3. Полученные результаты являются исходными данными для следующего исследования об энергетической эффективности дробления опасного для Земли объекта с учётом изменения скоростей, импульсов и кинетических энергий вторичных фрагментов.

Литература

1. Иванов В.Л., Меньшиков В.А., Плечинцев Л.А., Лебедев В.В. *Космический мусор. В 3-х томах. – Т.1. – М.: Патриот, 1996. – 360 с.*
2. Меньшиков В.А., Перминов А.Н., Урличич Ю.М. *Глобальные проблемы человечества и космос. – М.: ОАО «Издательство «МАКД», 2010. – 570 с.*
3. Алексеев Э.В., Меньшиков В.А., Мещеряков И.В. *На передовых рубежах. Очерки истории 50 ЦНИИ МО им. М.К.Тихонравова. – М.: НИИ КС им. А.А.Максимова, 2018. – 273 с.*

УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ КОНИЧЕСКОЙ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ

Ефремов В.А., Прохорчук К.В.
Научный руководитель: Никитин И.С.
ИАП РАН, МАИ
E-mail: lsg88@mail.ru

В современных авиационных конструкциях широко используются технические системы с высокими скоростями вращения для передачи мощности между элементами конструкции. Одной из таких систем является редуктор, представляющий собой пару взаимозацепленных шестерёнок. Как показывает практика, в процессе эксплуатации возможно разрушение такой конструкции из-за усталости материала [1]. В результате зацепления двух зубьев на поверхности контакта возникают контактные напряжения, а у ножки зуба – напряжения, обусловленные изгибом зуба, изменяющиеся во времени по пульсирующему циклу (коэффициент асимметрии $R = 0$). Именно эти циклические напряжения являются причиной усталостного разрушения зубьев.

В работе рассматривается коническая прямозубая зубчатая передача, составляющие которой изготовлены из высокопрочной углеродистой стали. Для построения геометрической модели и произведения расчётов на усталость используется программный комплекс САПР. Вид геометрической модели показан на рис. 1.

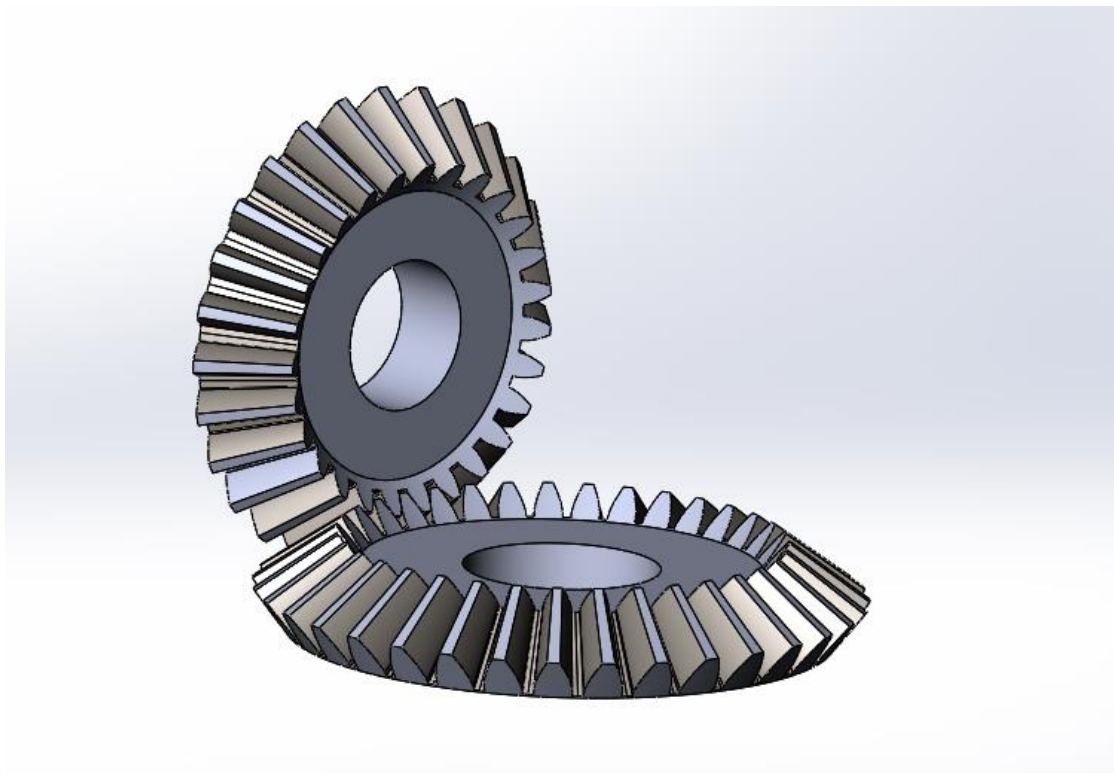


Рис. 1 Модель конической зубчатой передачи

Моделируется случай, когда конические колеса испытывают сверхмногоцикловое усталостное разрушение (СВМУ), т.е. характерное число циклов для такого режима составляет порядка $10^9 - 10^{10}$ [2]. Такая ситуация возможна при напряжениях, значения которых ниже классического предела усталости при достаточно высоких скоростях вращения зубчатых колёс.

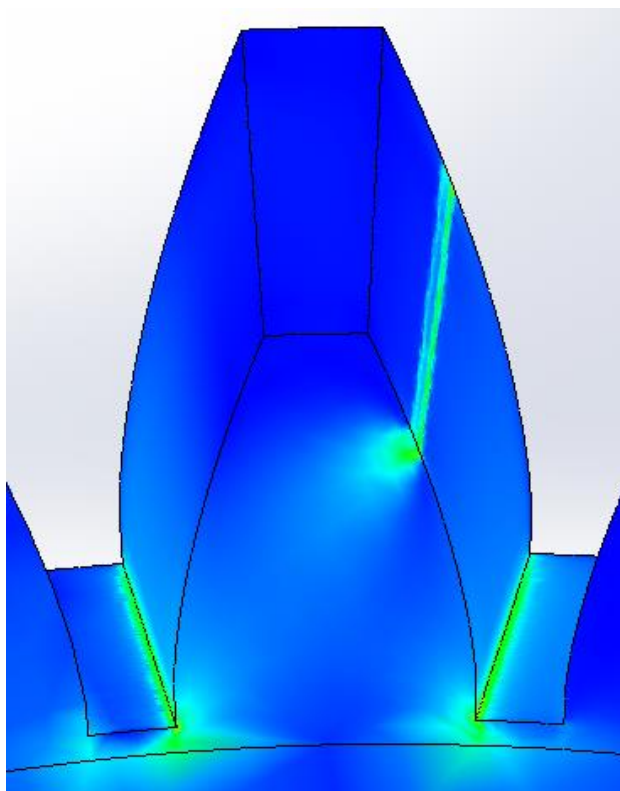


Рис 2. Распределение нагрузки по зубу колеса

1. Сначала рассматривается контактная задача, в результате которой были выявлены зоны, где возникает наибольшая концентрация напряжений. Построены эпюры напряжений, наглядно демонстрирующие картину распределения нагрузки по зубу колеса (рис. 2). По зонам, где напряжения максимальны, можно судить о наиболее вероятном зарождении усталостных трещин и дальнейшем их развитии.
2. По результатам задачи 1 рассчитана долговечность такой конической зубчатой передачи при заданных условиях, позволяющая оценить время эксплуатации конструкции.

Литература

1. Шанявский А.А. Моделирование усталостных разрушений металлов. Уфа. Изд-во научно-технической литературы «Монография». 2007. 498с.
2. Bathias C., Paris P. C. Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice. Dekker - NY. 2005. 328p.

ОБЗОР ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ МЕТОДОВ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ

Жавхлан Саруул
НИУ МГСУ, Каф. СиТМ
E-mail: saruul128@gmail.com

В данной работе рассматриваются методы территориальной защиты, основанные на концепции сейсмических барьеров, препятствующих проникновению сейсмических (акустических) волн в защищаемые территории. Возникновение этих задач связано с появлением при землетрясениях Рэлеевских волн высокой интенсивности в эпицентральных зонах, поскольку традиционные методы сейсмической защиты в этих случаях оказываются малоэффективными, а также с возведением массовых строительных объектов в сейсмически опасных зонах вблизи от эпицентров землетрясений.

Методы. Методы защиты зданий и сооружений от сейсмических воздействий условно могут быть подразделены на две группы:

- (I) Методы территориальной защиты. Суть их заключается в защите рассматриваемого объекта от проникновения сейсмических поверхностных волн Рэлея и Лява. Этот метод обосновывается на создании различного рода барьеров. К этой группе также относятся методы, основанные на усилении или замене грунтовых массивов на площадке строительства.
- (II) Конструктивные методы защиты. Методы, основанные на конструктивных решениях, направленных на создание сейсмостойких сооружений. В эту группу входят разнообразные сейсмоизолирующие устройства, а также динамические гасители колебания.

В данной работе дается обзор исследований, связанных с методами 1-ой группы. Поверхностные сейсмические волны (Рэлея, Рэлея-Лэмба, Лява и др.) представляют исключительную опасность для сооружений в особенности находящихся в зонах землетрясений высокой интенсивности. Необходимость разработки территориальных методов сейсмозащиты диктуется тем, что многие уникальные здания, исторические памятники архитектуры, а также атомные и тепловые электростанции находятся в сейсмически опасных районах, а их конструктивные особенности в определенных случаях не позволяют оснащать их эффективными системами сейсмозащиты. Это позволяет считать исследования по сейсмическим барьерам всех основных типов значимыми и актуальными. В зависимости от природы сейсмических волн могут применяться различные типы и конструктивные решения сейсмических барьеров.

Возможные типы сейсмических барьеров:

- Горизонтальные барьеры, защищающие определенную территорию от сейсмических волн.
- Вертикальные барьеры, используемые для отражения и диссипации энергии сейсмических волн.
- Свайные барьеры, применяемые для рассеивания сейсмической энергии.

Горизонтальный сейсмический барьер представляет собой относительно тонкий поверхностный слой с модифицированными физико-механическими свойствами, по сравнению со свойствами полупространства, рис.1., который препятствует распространению поверхностных сейсмических волн. Идея использования горизонтальных сейсмических барьеров восходит к теореме Чадвика [1], которая утверждает, что волны Рэлея не могут распространяться, если поверхность полупространства заземлена. Используя эту концепцию, можно попытаться создать условия, близки к условиям теоремы Чадвика, нагрузив поверхность Земли горизонтальным барьером. Барьеры этого типа исследовались в работах [2].



Рис. 1.1. Концепция горизонтального барьера, [2]

Вертикальные барьеры. Для защиты от объемных волн наиболее эффективными являлись бы пустотелые барьеры в виде траншей, или траншеи засыпанные разными материалами, быстрая акустическая волна которого существенно медленнее волн в окружающем грунте. Примерами исследований по вертикальным барьерам могут служить работы [3-5]. По результатам этих исследований было найдено, что вертикальные барьеры также могут служить эффективной защиты территорий. Надо отметить, что этот тип барьеров наиболее часто встречается в практике для защиты от антропогенных сейсмических волн, вызванных проезжающим транспортом, взрывными работами и т.п. В исследовании [6] вертикальные барьеры конечной длины, заполненные акустически более мягким материалом, чем окружающий грунт, предлагалось использовать для защиты от взрывных воздействий, рис.2.

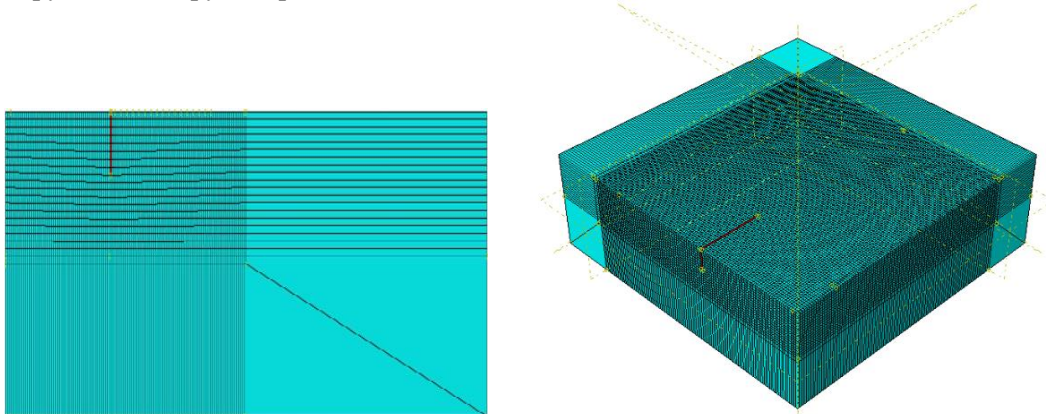


Рис.2. Плоская и пространственная модели вертикального барьера для защиты от взрывных воздействий, [6]

Барьер из свай. Для создания такого барьера предлагается использовать круговые сваи большого диаметра, состоящие из концентрических слоев с контрастными свойствами. Основная функция такого барьера – рассеивать энергию сейсмических волн. По-видимому, впервые эти барьеры применены при строительстве опор мостов Васка-Да-Гама (Португалия) и Рион-Антирион (Греция) [7-9], рис. 3.

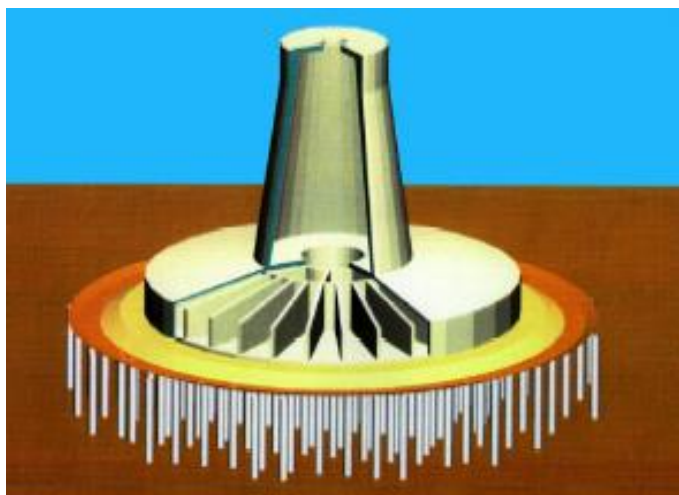


Рис.3. Решение, примененное для мостов Васко Да Гама и Рион-Антирион, схема свайного основания, [9]

Землетрясение магнитудой $M_w=6.4$, произошедшее 8 июля 2008 г. с эпицентром в 36 км от расположения моста Рион-Антирион, показало, что основные проектные антисейсмические решения были выбраны правильно.

Заключение. Рассмотренные сейсмические барьеры всех основных типов могут иметь определенные преимущества перед более традиционными системами сейсмической защиты, в частности:

- ✓ Барьеры могут использовать для защиты зданий, построенных на слабых грунтах, подверженных разжижению.
- ✓ Барьеры, как устройство сейсмической защиты, расположены за пределами защищаемых зданий и сооружений - возможный отказ или разрушение какой-либо части барьера не влечет за собой фатального разрушения защищаемого объекта.
- ✓ Барьеры защищают фундаментную плиту, как правило, остающуюся незащищенной при применении других методов сейсмозащиты.

В завершение надо отметить, что сейсмические барьеры, будучи эффективным средством для защиты от поверхностных волн Рэлея, Лява и Рэлея-Лэмба, оказываются малоэффективными при создании защиты от объемных сейсмических волн. Защита от объемных сейсмических волн требует применения других методов, например, основанных на использовании сейсмоизолирующих устройств.

Литература

1. Chadwick P. & Smith G.D. Foundations of the theory of surface waves in anisotropic elastic materials // *Adv. Appl. Mech.*, 1977, vol. 17, pp. 303 – 376.
2. Kuznetsov S.V., Nafasov A.E. Horizontal acoustic barriers for protection from seismic waves // *Advances in Acoustics and Vibration*. 2011, Article ID 150310, pp. 1-8.
3. Bornitz G. *Über die Ausbreitung der von Grozklolbenmaschinen erzeugten Bodenschwingungen in die Tiefe* Springer-Verlag, Berlin, 1931.
4. Barkan D.D. *Dynamics of Bases and Foundations*, McGraw-Hill, New York, 1962. 434p. (Russian edition, 1948).
5. Woods R.D. Screening of surface waves in soils // *J. Soil Mech. Found. Div, ASCE*, 1968, vol. 94, pp. 951-977.
6. Bo Qiu, Limam A., Djeran-Maigre I. Numerical study of wave barrier and its optimization design // *Finite Elements in Analysis and Design*, 2014, vol. 84, pp. 1–13.
7. Pecker A., Salençon J. Ground Reinforcement In Seismic Area." *Proc. of the XI Panamerican Conf. on Soil Mech. and Geotech. Eng.*, Iguasu, 1999, pp. 799-808.
8. Pecker A., Pender M. Earthquake resistant design of foundations: new constructions // *GeoEng2000; Vol 1: Invited paper*. 2000, pp. 313-332.
9. Pecker A. Enhanced seismic design of shallow foundations: example of the Rion Antirion bridge // *4th Athenian Lecture on Geotechnical Engineering*, 2006, pp. 1-23.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ НЕРАЗЪЕМНОГО СОЕДИНЕНИЯ ИЗ РАЗНОИМЕННЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ

Жигалова М.Ю., Галиева Э.В., Ахунова А.Х.

Научный руководитель – д.т.н., Валитов В.А.

ИПСМ РАН

E-mail: marya.zhig@yandex.ru

Проведено компьютерное и физическое моделирование процесса сварки давлением образцов, имитирующих составные части биметаллической детали газотурбинного двигателя типа диск-вал из гетерофазных деформируемых жаропрочных никелевых сплавов. На основании проведенных исследований показана возможность получения неразъемного твердофазного соединения типа диск-вал из никелевых сплавов ЭП975 и ЭК79 с предварительно подготовленной ультрамелкозернистой структурой в процессе сварки давлением в условиях сверхпластичности по схеме деформации, которая обеспечивает сдвиговую деформацию на контактной поверхности соединяемых материалов.

Введение. Одним из основных материалов, используемых в авиадвигателестроении, являются жаропрочные сплавы на основе никеля. При этом различные детали и узлы двигателя зачастую изготавливаются из разнородных жаропрочных сплавов. Для получения неразъемных соединений таких деталей перспективным является использование процесса сварки давлением (СД) в твердой фазе. При сварке давлением пластическая деформация приконтактных объемов развивает физический контакт свариваемых поверхностей и улучшает протекание диффузионных процессов, вследствие чего образуется твердофазное соединение [1-3]. Работоспособность двигателя определяется, главным образом, качеством соединения его узлов и деталей, поскольку наличие дефектов в таких местах может привести не только к разрушению этой детали, но и к разрушению всего двигателя. Поэтому повышение качества сварного соединения в таких конструкциях является актуальной задачей. Согласно известным экспериментальным данным, сдвиговая деформация вблизи свариваемых поверхностей способствует повышению качества сварного соединения и его прочности. Научный интерес представляет развитие метода сварки давлением с использованием схемы деформации, обеспечивающей сдвиговую деформацию на контактной поверхности соединяемых материалов [4].

В данной работе методами компьютерного и физического моделирования исследован процесс получения неразъемного твердофазного соединения (ТФС) типа диск-вал из никелевых сплавов ЭП975 и ЭК79 с мелкозернистой структурой типа микродуплекс в процессе сварки давлением по схеме деформации, которая обеспечивает сдвиговые деформации на контактной поверхности соединяемых материалов.

Материалы и методы исследований. В качестве материала для исследований были выбраны заготовки из деформируемых жаропрочных никелевых сплавов ЭП975 и ЭК79, в которых в результате предварительной деформационной и термической обработки была сформирована мелкозернистая структура типа микродуплекс. Из указанных сплавов были изготовлены модельные заготовки, имитирующие составные части биметаллической детали типа диск-вал.

Компьютерное конечно-элементное моделирование сварки диска и вала проводили в двумерной постановке (осесимметричная задача) с помощью пакета прикладных программ DEFORM-2D. Для получения неразъемного соединения сварку давлением проводили на универсальной машине RMS-100 фирмы «Schenck». Сварку образцов в виде «вала» из сплава ЭК79 и «диска» из сплава ЭП975 проводили при температуре 1100°C и скорости деформации 10^{-4} с^{-1} путем внедрения «вала» в «диск». Общая высота «диска» составляла 15 мм. Образец в виде «вала» представлял собой цилиндрическую часть высотой 18 мм, переходящую в усеченный конус высотой 15 мм. Деформация осуществлялась перемещением образца в виде вала относительно другого образца в виде диска, что достигалось передвижением траверсы испытательной машины на 1, 2 и 3 мм. Величина перемещения составляла 8...25 % от значений высоты конической части вала. После сварки давлением сварные образцы были подвергнуты термической обработке, включающей высокотемпературный нагрев и старение.

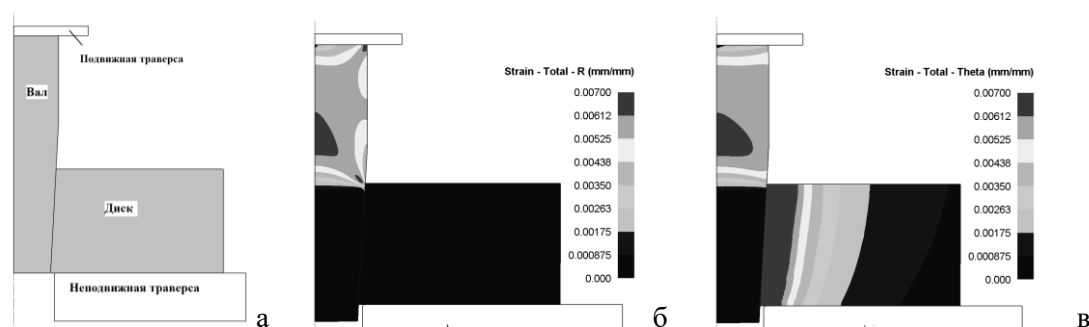


Рис. 1. Конечно-элементная модель (а) и распределение радиальных (б), а также и окружных (в) компонент деформации при сварке давлением детали «диск-вал»

Результаты исследования. При анализе результатов компьютерного моделирования рассматривалось распределение сдвиговых компонент деформации, поскольку при данной схеме деформации нормальные компоненты деформации слабо влияют на качество сварного соединения. По эпюрам распределения радиальных компонент деформации ϵ_R (рис. 1б) можно сказать, что при сварке по этой схеме ϵ_R достигают своего максимума в верхней части вала, при этом в области контакта диска и вала они очень малы. При этом окружные деформации ϵ_θ локализуются на контактной поверхности диска и в верхней части вала (рис. 1в). Картина распределения радиальных компонент напряжений σ_R (рис. 2а) показали, что в рассматриваемом случае сварки на контактных поверхностях наблюдаются сжимающие напряжения. Вместе с тем, при анализе распределения окружных компонент напряжений σ_θ (рис. 2б) обнаружено, что приконтактной области диска локализуются растягивающие напряжения.

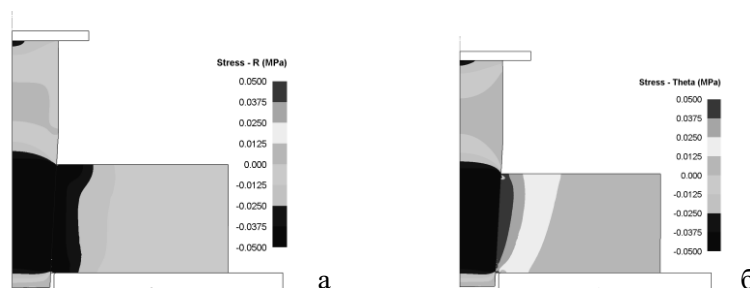


Рис. 2. Распределение радиальных компонент напряжений σ_R (а) окружных компонент напряжений σ_θ (б) при сварке давлением детали «диск-вал»

Итак, результаты конечно-элементного моделирования позволили заключить, что деформация в цилиндрической части вала несколько больше, чем в зоне контакта с диском, при этом степени деформации очень малы (рис. 1 б, в). Выявлено, что степень деформации и сдвиговые деформации в зоне контакта «вала» и «диска» распределены достаточно равномерно и находятся в интервале 1-6 % и 0,75-3 %, соответственно, при осевом смещении «вала» относительно «диска» на 8-25 %, что составляет расчетную степень деформации величины перемещения вала по сравнению с толщиной диска.

По результатам физического моделирования установлено, что при осевом смещении «вала» относительно «диска» формируется беспористое соединение без каких-либо выделений избыточных фаз. После сварки в обоих сплавах сохраняется УМЗ структура типа «микродуплекс». В сплаве ЭК79 термическая обработка приводит к растворению некогерентных выделений γ' - фазы и увеличению среднего размера зерен γ - фазы, в которых при последующем старении выделяются когерентные частицы упрочняющей γ' - фазы (табл. 1). При микрорентгеноспектральном анализе зоны ТФС установлено, что в результате деформации происходит диффузия вольфрама и алюминия из сплава ЭП975 в сплав ЭК79 и диффузия хрома и железа в обратном направлении. В результате термической обработки (ТО) в зоне ТФС наблюдается монотонное изменение концентрации легирующих элементов при переходе от одного материала к другому.

Табл.1. Параметры микроструктуры сплавов

| Состояние | Величина смещения вала относительно диска, мм | ЭП975 | | ЭК79 | |
|----------------------|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | | d_{γ} , мкм | d_{γ} , мкм | d_{γ} , мкм | d_{γ} , мкм |
| Исходное | - | 8,0±0,4 | 3,3±0,3 | 9,5±0,9 | 2,7±0,2 |
| Сварка давлением | 1 | 7,5±0,5 | 3,2±0,3 | 11,3±0,8 | 2,5±0,2 |
| | 2 | 6,5±0,4 | 4,3±0,3 | 11,1±0,7 | 2,6±0,2 |
| | 3 | 9,6±0,6 | 3,4±0,2 | 16,1±0,9 | 2,3±0,2 |
| Сварка давлением +ТО | 1 | 8,8±0,9 | 3,4±0,3 | 120±14 | ≤0,1 |
| | 2 | 9,4±0,8 | 3,5±0,4 | 113±12 | ≤0,1 |
| | 3 | 10,5±0,9 | 3,5±0,3 | 123±20 | ≤0,1 |

Установлено, что значения микротвердости в зоне ТФС находятся между значениями микротвердости соединяемых материалов в пределах погрешности. Термическая обработка не приводит к существенным изменениям в значениях микротвердости сплавов и зоны ТФС. Прочность соединения оценивали по результатам механических испытаний на растяжение при комнатной температуре. Установлено, что максимальная прочность сварного соединения наблюдается после сварки давлением при смещении вала относительно диска на 2 мм и последующей термической обработки и составляет 0,68 от прочности сплава ЭК79.

Выводы

1. Показано, что метод сварки давлением в условиях сверхпластичности никелевых сплавов ЭП975 и ЭК79 с УМЗ структурой типа, при котором обеспечивается сдвиговая деформация, является эффективным методом получения твердофазного соединения, в частности, применительно к биметаллической детали типа диск-вал.

2. Экспериментально показано, что значения степени деформации и сдвиговых деформаций в зоне контакта «вала» и «диска» порядка 1-2%, являются достаточными для получения качественного ТФС, благодаря отсутствию пор и выделений избыточных фаз.

3. Максимальная прочность твердофазного соединения сплава ЭП975//ЭК79 наблюдается после термической обработки и составляет 0,68 от прочности сплава ЭК79.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-19-00685). Экспериментальные исследования были выполнены на базе Центра коллективного пользования научным оборудованием ИПСМ РАН. Режимы деформации сплавов с микродуплексной структурой определены в рамках темы госзадания № АААА-А17-117041310215-4.

Литература

1. Логунов, А.В. Современные жаропрочные никелевые сплавы для дисков газовых турбин / А.В. Логунов, Ю.Н. Шмотин // М: - ООО «Наука и технология». – 2013, - 264 с.
2. Бычков, В.М. Исследование свариваемости жаропрочного никелевого сплава ЭП742 методом линейной сварки трением / В.М. Бычков, А.С. Селиванов, А.Ю. Медведев, В.А. Супов, Б.О. Большаков, Р.Р. Гринь, Ф.Ф. Мусин // Вестник УГАТУ. – 2012. - №7. – С. 112-116.
3. Лукин, В.И. Исследование влияния технологии ротационной сварки трением деформируемого жаропрочного никелевого сплава ВЖ175 на структуру и прочностные характеристики сварных соединений / В.И. Лукин, В.Г. Ковальчук, М.Л. Саморуков, Ю.М. Гриднев // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. - 2011. - С. 114-121.
4. Валитов, В.А. Исследование напряженно-деформированного состояния и микроструктуры в зоне твердофазного соединения типа диск-вал из разноименных сплавов на основе никеля / В.А. Валитов, А.Х. Ахунова, Э.В. Галиева, С.В. Дмитриев, Р.Я. Лутфуллин, М.Ю. Жигалова // Письма о материалах. – 2017. – Т.7. – №2. – С. 180-185.

СВЕРХМНОГОЦИКЛОВАЯ УСТАЛОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Загаровский А.А.

аспирант, каф. ФКМ, МАИ

Научный руководитель: проф., д.ф.-м.н. Беклемишев Н.Н.

Рассматриваемая проблема сверхмногоцикловой усталости (СВМУ) связана, прежде всего, с поведением материала, которое соответствует разным масштабным уровням. Эволюция в поведении металла реализуется от микро масштабного уровня к мезо-, а, далее, к макроскопическому масштабному уровню, а не наоборот. Металл, первоначально, накапливает повреждения на микро, а, далее, на остальных масштабных уровнях. Это означает, что, так называемый «предел усталости», на самом деле, представляет собой границу перехода от микроскопического масштабного уровня в поведении металла к мезо-масштабу, или, соответственно от сверхмногоцикловой к многоцикловому (МНЦУ) усталости.

Величина критического напряжения, определяющая разрушение, в значительной степени зависит от области перехода с одного масштабного уровня разрушения к другому. В этой области разброс долговечности составляет три порядка. Это связано с тем, что при выбранном уровне напряжения металл может с разной вероятностью разрушиться, как в области МНЦУ, с формированием очага на поверхности, так и в области СВМУ, формируя очаг под поверхностью. Поэтому, например, разрушение зубчатого колеса при наработке 50 часов и при наработке 5000 часов оказывается в пределах этого разброса, что совершенно не устраивает эксплуатанта. Причём выявленные дефекты механической обработки поверхности зубчатых колёс привели к ещё большему снижению наработки до разрушения (более чем на порядок) по сравнению с неповреждённой поверхностью по критерию МНЦУ в переходной области.

Построенные усталостные кривые для металлов подразумевают использование неразрушенных образцов на базе 10^7 циклов для определения кривой усталости в области МНЦУ. Однако эти образцы могут принадлежать, как одной, так и другой области, т.е. СВМУ. Поэтому, усталостные кривые требуют других принципов построения. Более того, как указано выше, переход от одного масштабного уровня к другому реализуется в диапазоне уровня напряжений, который сегодня никем не определён.

Область СВМУ уже сегодня заявляет о себе в имеющихся случаях разрушения авиационных деталей в эксплуатации. Это требует изучения проблемы СВМУ на образцах и выработке новых требований к проведению усталостных испытаний металлов. Необходим учет масштаба для построения усталостных кривых с определением уровней напряжения, являющегося границей перехода от одного масштабного к другому.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПОСТОРОННЕЙ ЧАСТИЦЫ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ СЖАТИИ СЛОЯ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

Замараева Ю.В., Логинов Ю.Н.
Уральский Федеральный университет
E-mail: zamaraevajulia@yandex.ru

Рассмотрено поведение частицы интерметаллида в алюминиевом сплаве АМг2. Моделирование выполнено в среде программного продукта DEFORM-2D. В схеме сжатия пластического слоя получено поле деформаций. Из анализа его следует, в частности, что вдоль направления, ортогонального направлению сжатия, возможен отрыв металла от поверхности частицы с образованием поры и ее односторонним развитием. Приведены примеры структурного анализа, подтверждающего появление и развитие пор при деформации цветных металлов.

Введение. Полуфабрикаты и изделия в операциях обработки давлением обладают различным уровнем свойств и различным содержанием посторонних частиц, загрязняющих металл. В ряде случаев эти частицы специально вводят в состав материалов, чтобы достичь определенных эффектов. Так, электротехническую медь специально насыщают кислородом за пределами его растворимости, чтобы добиться эффекта более полной нейтрализации вредных примесей, снижающих электропроводность. Тем самым, по существу, получают композиционный материал: медную матрицу, содержащую частицы оксидов [1]. Алюминиевые сплавы легируют другими металлами, в том числе для того, чтобы получить частицы интерметаллидов, обладающих высоким уровнем твердости и упрочняющих материал основы [2], такой же эффект применяют при создании магниевых сплавов [3,4]. Наличие инородных частиц в металле создает неоднородности распределения напряжений и деформаций при пластической обработке, на что обращали внимание многие авторы [5, 6]. Целью работы является оценка последствий присутствия твердой частицы на напряженно-деформированное состояние окружающего ее металла.

Методы. Для определения формоизменения алюминия вблизи частицы оксида алюминия применен программный комплекс DEFORM. Реализованы условия плоской деформации. В подпрограмме DEFORM-2D Pre-processor создана конечно-элементная модель оксида алюминия и металла. Размеры частицы и металла выбраны произвольными. Металл – алюминиевый сплав АМг2, температура металла 20° С, тип материала упруго-пластический. Сформулированы условия на границе между частицей и деформируемым металлом: частица представляет собой абсолютно твердое тело, металл не может внедряться в него, но может отрываться от его поверхности. Заданы перемещения верхней и нижней поверхностей (рис. 1). Круглая частица (показана темной стрелкой) не зафиксирована в пространстве. На контактной границе металла и оксида задан закон трения по Кулону ($\mu = 0,01$) и взаимодействие с возможностью отрыва деформируемого металла от поверхности оксида.

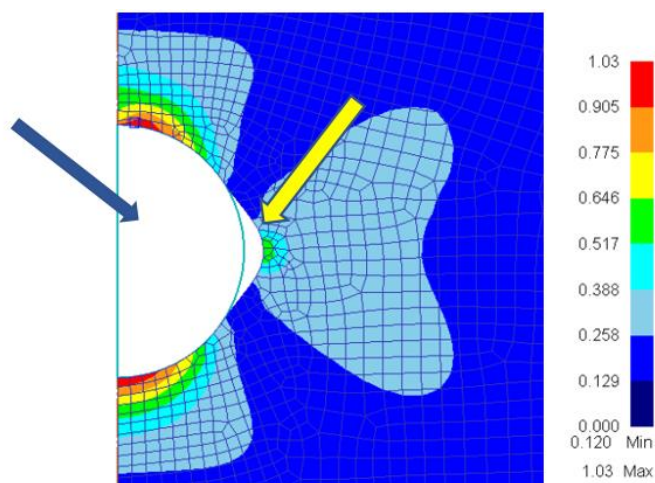


Рис.1. Поле распределения степени деформации вокруг круглой частицы (темная стрелка) с образованием поры (светлая стрелка), изображена правая половина очага деформации

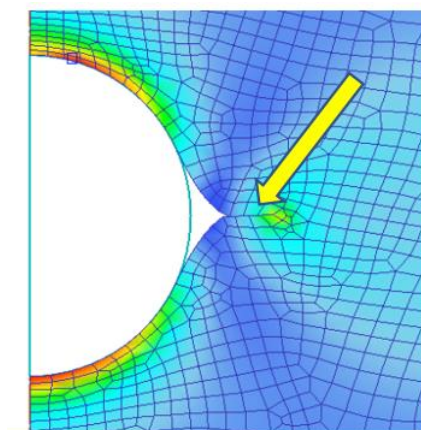


Рис.2. Образование складки (светлая стрелка) после продолжения нагружения материала круглой частицы, изображена правая половина очага деформации

Дальнейшее продолжение нагружения материала приводит к сближению поверхностей поры вплоть до их соприкосновения (рис.2).

Если считать наличие посторонней частицы в металле дефектом, то после деформационного воздействия вместо одного дефекта в данной схеме напряженного состояния мы получаем три дефекта. Первый дефект – сама частица, второй дефект – наличие при ней поры и третий дефект – наличие несплошности в виде схлопнутых, но не схватившихся между собой поверхностей поры. В [7] показано, что при наличии постоянно действующей по проходам деформации удлинения поры также удлиняются, но с меньшей интенсивностью, чем сам металл.

Развитие дефектов описанного выше типа показано в работе [8] с использованием метода электронно-ионной микроскопии с созданием объемного 3D-изображения.

Литература

1. Логинов Ю.Н., Демаков С.Л., Илларионов А.Г., Иванова М.А., Карабаналов М.С. Возникновение пористых структур в кислородсодержащей меди при деформационном воздействии. Физическая мезомеханика. 2013. Т. 16. № 6. С. 99-102.
2. Тептерев М.С., Коновалов С.В., Арышенский В.Ю. Исследование влияния режимов термомеханической обработки алюминиевого сплава 5xxx группы на коррозионную стойкость. Производство проката. 2018. № 9. С. 32-38.
3. Mohammad Saadati, Rasoul Azari Khosroshahi, Gholamreza Ebrahimi, Mohammad Jahazi. Formation of precipitates in parallel arrays on LPSO structures during hot deformation of GZ41K magnesium alloy. Materials Characterization. 2017. V. 131. P. 234-243.
4. Zheng K.Y., Dong J., Zeng X.Q., Ding W.J. Precipitation and its effect on the mechanical properties of a cast Mg–Gd–Nd–Zr alloy. Mater. Sci. Eng. A, 2008. V. 489. P. 44-54.
5. Smirnov S.V., Pugacheva N.B., Soloshenko A.N., Tropotov A.V. Plastic deformation of a high-alloy brass. The Physics of Metals and Metallography. 2002. V. 93. № 6. P. 584-593.
6. Kanaun S., Martinez R. Numerical solution of the integral equations of elasto-plasticity for a homogeneous medium with several heterogeneous inclusions. Computational Materials Science. 2012. V. 55. P. 147-156.
7. Логинов Ю.Н., Еремеева К.В. Влияние типа пластической деформации на видоизменение одиночной поры. Деформация и разрушение материалов. 2011. № 4. С. 40-44.
8. Логинов Ю.Н., Демаков С.Л., Илларионов А.Г., Иванова М.А. Взаимодействие частицы оксида меди с медью в процессе волочения. Металлы. 2012. № 6. С. 36-45.

МОДЕЛЬ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ПЬЕЗОМЕХАНОДИФФУЗИИ С УЧЕТОМ РЕЛАКСАЦИИ ДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Зверев Н.А.

Научный руководитель — доцент, д.ф.-м.н. Земсков А.В.

МАИ, Москва

E-mail: NikolayZverev1995@gmail.com

В последнее время все больший научный и практический интерес представляют связанные нестационарные модели механики деформируемого тела, в частности, модели механодиффузии, поскольку диффузия, влияя на напряженно-деформированное состояние тела, может оказывать также и нежелательное воздействие на конструкции или их отдельные элементы. Например, диффузия, вызывая движение вакансий и дислокаций, может влиять на процесс трещинообразования и старения материалов. В связи с этим, представляется практически важным вопрос о качественной и количественной оценке взаимодействия механических и диффузионных полей. Также немаловажную роль в вопросах моделирования технических систем играет учет электромагнитных полей, наличие которых может вызывать пьезоэлектрические и пьезомагнитные эффекты.

В работе рассматривается одномерная нестационарная задача об определении напряженно-деформированного состояния многокомпонентного пьезоэлектромагнитного слоя с учетом явления массопереноса. При рассмотрении переноса вещества учитываются релаксационные эффекты, характеризующиеся конечными скоростями распространения диффузионных возмущений. Физико-механические процессы, протекающие в данном теле, которое можно рассматривать как сплошную однородную среду, описываются системой дифференциальных уравнений в частных производных, состоящей из линеаризованных уравнений движения, массопереноса и уравнений Максвелла [1-5]. Замыкают постановку задачи начально-краевые условия.

Решение задачи ищется по методу функций Грина с использованием интегрального преобразования Лапласа по времени и разложения искомым функций в тригонометрические ряды Фурье по синусам и по косинусам.

Оригиналы изображений Лапласа определяются с помощью таблиц операционного исчисления.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №17-08-00663).

Литература

1. Tarlakovskii D.V., Vestyak V.A., Zemskov A.V. Dynamic Processes in Thermoellectromagnetoelastic and Thermoelastodiffusive Media // Encyclopedia of thermal stress, volume 2, C-D, Springer Dordrecht Heidelberg New York London, Springer reference. 2014. – pp. 1064 – 1071.
2. N A Zverev, A V Zemskov, D V Tarlakovskii. One-dimensional problem of piezoelectric electromagnetic diffusion for a layer // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – No 1129. – 012040.
3. Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Постановка одномерной задачи термоэлектромагнитоупругой диффузии // Материалы XXIV Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т.2. - М.: ООО «ТРП», 2018. – с. 157-163.
4. Deswal S., Kalkal K. Electromagneto-thermodiffusive problem for short times without energy dissipation // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2013. – Vol. 86, No. 3. – P. 705-715.
5. Kumar R., Chawla V. Fundamental Solution for the Plane Problem in Magnetothermoelastic Diffusion Media // CMST. – 2013. – Vol. 19, No 4. – P. 195-2077.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ В ПРОЦЕССЕ ОСАДКИ ТРЕХСЛОЙНОЙ ЖЕСТКОПЛАСТИЧЕСКОЙ ПОЛОСЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ТРЕНИЯ

Идрисов Д.М.^{1,2}

¹Московский физико-технический институт (государственный университет)

²Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

E-mail: idrisov.dim@mail.ru

Приведены результаты численного моделирования процесса осадки трехслойной полосы при условиях проскальзывания и прилипания на границе контакта слоев, где внутренний слой полосы предполагается жесткопластическим и упрочняющимся по закону Свифта, а два внешних слоя - идеально жесткопластическими.

В данной работе рассматривается процесс осадки трехслойной полосы, между параллельными шероховатыми плитами в условиях плоско деформированного состояния, где внутренний слой является упрочняющимся жесткопластическим телом, а слои примыкающие к плитам идеально жесткопластическими.

Решение для случая, когда все слои идеально жесткопластические получено в [1], для идеально жесткопластической упрочняющейся полосы в [2,3] и для многослойной полосы в [4,5].

В [6] получено решение для процесса осадки полосы, состоящей из двух слоев идеально жесткопластического материала, примыкающих к плитам, и внутреннего жесткопластического упрочняющегося слоя. В зависимости от того какой именно режим трения реализуется, эквивалентная скорость деформаций будет иметь сингулярный вид на границе контакта слоев или же на границе с плитой. При этом принимался достаточно общий закон изотропного упрочнения. Получены аналитические значения коэффициента интенсивности скорости деформаций (КИСД) для случая, когда коэффициент трения на соответствующей границе равен 1.

КИСД контролирует интенсивность пластической скорости деформации и накопленной деформации в непосредственной окрестности поверхности трения, а также контролирует процесс формирования узкого слоя с сильно измененными свойствами в окрестности поверхностей трения при обработке давлением. Интенсивная пластическая деформация, возникающая вблизи поверхностей трения из-за сингулярного поля скоростей, оказывает влияние на образование ультра мелкозернистых слоев вблизи этих поверхностей [6,7], такие материалы чрезвычайно перспективны для применения в качестве конструкционных материалов.

В данной работе выполнено численное моделирование процесса осадки, где внутренняя полоса предполагается жесткопластическим и упрочняющимся по закону Свифта [8], в результате получены численные значения эквивалентной скорости деформаций при различных режимах трения. Используя полученные значения эквивалентной скорости деформаций, рассчитаны значения КИСД для различных режимов трения, а также при различных коэффициентах трения.

Из полученных результатов следует, что в процессе осадки трехслойной полосы с упрочняющимся жесткопластическим слоем, значение КИСД снижается в разы по сравнению со случаем, когда все три полосы предполагаются идеально жесткопластическими [9], соответственно процесс образования ультра мелкозернистых слоев вблизи этих поверхностей трения будет менее интенсивным.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-08-01063.

Литература

1. Хилл Р. Математическая теория пластичности. М.: Гостехиздат, 1956. 407 с.
2. Дудукаленко В.В., Ивлев Д.Д. О сжатии полосы из упрочняющегося пластического материала жесткими шероховатыми плитами // Докл. АН СССР. 1963. Т. 153. № 5. С. 1024–1026.
3. Быковцев Г.И. О сжатии анизотропно упрочняющегося пластического слоя шероховатыми плитами // Докл. АН СССР. 1964. Т. 157. № 1. С. 66–68.

4. Alexandrov S., Mishuris G., Miszuris W. An analysis of the plane-strain compression of a three layer strip // Arch. Appl. Mech. 2001. V. 71. № 8. P. 555–566.
5. Alexandrov S., Tzou G.Y., Huang M.N. Plane strain compression of rigid/perfectly plastic multi-layer strip between parallel platens // Acta Mech. 2006. V. 184. № 1–4. P. 103–120.
6. Александров С.Е, Гольдштейн Р.В. Исследование процесса осадки трехслойной жесткопластической полосы между параллельными плитами // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2014. № 6. С. 120-131.
7. Griffiths B.J. Mechanisms of white layer generation with reference to machining and deformation processes // Trans. AMSE J. Trib. 1987. V. 109. P. 525–530.
8. Rees D.W.A. Basic engineering plasticity. Oxford: Butterworth- Heinemann. 2006.
9. Alexandrov S., Kuo C.-Y., Jeng Y.-R. A numerical method for determining the strain rate intensity factor under plane strain conditions // Continuum Mech. Thermodyn. 2016. V. 28. P. 977–992.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА С УЧЕТОМ ДИСЛОКАЦИОННО-ДИСКЛИНАЦИОННОГО МЕХАНИЗМА

Казанцева А.В.

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
Пермь, Россия
E-mail: belenkay96@mail.ru

В работе рассматриваются вопросы построения трехуровневой статистической модели способной описать процессы интенсивного пластического деформирования поликристаллических образцов, которые нашли широкое применение в современных прогрессивных технологиях обработки материалов.

Для физического анализа эволюции дефектной структуры на уровне кристаллитов и их границ предлагается трехуровневая статистическая модель. Основным механизмом неупругого деформирования представительного объема поликристалла является движение краевых дислокаций по системам скольжения. Подробно исследуются процессы изменения микроструктуры материала, приводящие к формированию новых зерен.

Согласно экспериментальным исследованиям причиной появления фрагментированной структуры и последующего дробления зерен являются мощные упругие напряжения, источники которых возникают на межзеренных границах и стыках [1]. Для описания процессов фрагментации и дробления зерен в работе вводятся специальные дефекты – дисклинации. При неоднородной пластической деформации поликристаллического агрегата в соседних зернах зарождаются стыковые дисклинации –дефекты структуры с качественно новыми свойствами. С ростом накопленной пластической деформации эти линейные структуры ротационного типа охватывают весь деформируемый поликристалл непрерывной сеткой и увеличивают свою мощность. Важно заметить, что специальные введенные дефекты образуются ввиду неоднородности пластического деформирования.

Предложена и проанализирована модель формирования субструктуры поликристалла при пластической деформации. Для описания дробления в рамках трехуровневой статистической модели [2,3] вводятся соответствующие параметры, которые характеризуют взаимные развороты фрагментов и их ориентацию. В процессе деформирования рассматриваемые параметры изменяются, т.к. являются внутренними переменными. С целью описания процесса изменения микроструктуры в работе строятся эволюционные соотношения на основе физических представлений о дислокационно–дисклинационном механизме измельчения микроструктуры материала. Параметры поворота, в свою очередь, связываются со свойствами границы фрагментов с помощью теории совпадающих узлов в границе [4]. Наиболее эффективным способом появления фрагментированной структуры и получения качественно новых материалов является интенсивное пластическое деформирование.

Представленная работа является частью более общей модели, используемой для постановки и решения физически и геометрически нелинейных краевых задач, возникающих при исследовании технологических процессов обработки металлов давлением (в том числе – в режиме сверхпластичности) [2,3].

Литература

1. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.
2. Трусов П.В., Швейкин А.И., Нечаева Е.С., Волегов П.С. Многоуровневые модели неупругого деформирования материалов и их применение для описания эволюции внутренней структуры // Физическая мезомеханика. – 2012. – Т. 15, №1. – С. 33-56.
3. Трусов П.В., Швейкин А.И., Янц А.Ю. О разложении движения, независимых от выбора системы отсчета производных и определяющих соотношениях при больших градиентах перемещений: взгляд с позиций многоуровневого моделирования // Физическая мезомеханика. – 2016. – Т.19. №2. – С. 47-65.
4. Жилиев А.П., Пшеничников А.И. Сверхпластичность и границы зерен в ультрамелкозернистых материалах. – М.: Физматлит, 2008. – 320 с.

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Караванова А. Г.

Научный руководитель - д.т.н, проф. Калашников А.С.

Московский политехнический университет

E-mail: alexandr_kalashnikov45@rambler.ru

В современных конструкциях авиационных агрегатов, узлов и деталей авиационных двигателей широко используются зубчатые колеса в следующих передачах: цилиндрических с прямыми и криволинейными зубьями, внешнего и внутреннего зацепления и конических с прямыми и криволинейными зубьями.

Целью является разработка рекомендаций для достижения 5-й степени точности изготовления зубчатых колес, а в перспективных изделиях - 4-й степени (по ГОСТ 1 41671-91, ОСТ 1 41667-89).

Задачей является повысить точность изготовления, используя метод “зубохонингование” вместо шлифования поверхностей зубчатых колес, снизить коробление путем исключения концентрации нагрузок на локальных участках поверхности зубьев применив “азотирование” в качестве химико-термической обработки взамен цементации.

Метод цементации, обеспечивающий твердость поверхности зубьев *HRC* 58...62, имеет ряд недостатков: деформации и усадки из-за высокой температуры процесса (900...950 °С), дефекты: шлифовочные прижоги, напряжения растяжения и трещины. Твердость сердцевины *HRC* 39. .42,5. Выбор более низкой температуры ионного азотирования в интервале 500...550 °С снижает интенсивность образования азотированного слоя. Шероховатость поверхности после ионного азотирования не изменяется. Высокое качество химико-термического упрочнения зубьев при нагреве до температуры 500...600°С приводит к снижению образования дефектов, при этом обеспечивая заданную твердость сердцевины и несущего слоя, высокое качество поверхностного слоя и заданную шероховатость поверхности зубьев $Ra \geq 0,2$ мкм.

При шлифовании с поверхности зубьев снимается припуск 0,2...0,25 мм. Шероховатость поверхности зубьев $Ra = 0,4$. Припуск обработки зубьев 0,020...0,030мм позволяет исправить погрешности профиля и направления зубьев, уменьшить величину биения зубчатого венца и разность окружных шагов, а также дает возможность применить модификации и получение на выходе шероховатости поверхности зубьев $Ra = 0,1$ мкм. При этом твердость поверхности зубьев равна твердости сердцевины. Это дает возможность исключить операцию низкотемпературного стабилизирующего отпуска ввиду отсутствия коробления.

Предложенные рекомендации изготовления цилиндрических зубчатых колес позволяют снизить деформации зубьев в процессе химико-термической обработки, устранить возникновение дефектов, прожогов и микротрещин. Операция зубохонингования позволяет увеличить точность изготовления зубьев (снизить погрешность профиля на изготовления зубьев, радиальное биение и рациональность окружных шагов), а также снизить шероховатость боковых поверхностей зубьев до $Ra = 0,1$ мкм.

СТРУКТУРНЫЕ ТРАНСФОРМАЦИИ УГЛЕРОДНЫХ АЭРОГЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Клявлиная А.И.¹, Рысаева Л.Х.², Баймова Ю.А.^{1,2}

¹Башкирский государственный университет, г. Уфа,

²Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа.

E-mail: alsou1961@yandex.ru

Недавние успехи исследователей в создании новых углеродных структур различной морфологии открывают широкие перспективы для разработки углеродных материалов с качественно новыми свойствами. Такими перспективными материалами являются ячеистые структуры (или углеродные аэрогели), которые обладают высокой деформируемостью, хорошими характеристиками адсорбции и проводимости. В этой работе рассматривается ячеистая углеродная структура, состоящая из повторяющихся ячеек, стенки которых образованы углеродными нанолентами. Показано, что структурные изменения существенно зависят от скорости деформации и направления приложенной нагрузки.

Введение. Различные углеродные наноструктуры со сложной геометрией представляют большой интерес из-за новых физических, механических и электронных свойств. Многообещающие результаты были получены для трехмерных углеродных структур различной морфологии, таких как скомканный графен, углеродные аэрогели, алмазоподобные фазы и др. Графеновые аэрогели или ячеистые сотовые структуры представляют собой многообещающий новый класс материалов, поскольку они объединяют свойства графена, но при этом демонстрируют новых свойства в качестве материалов со сложной архитектурой, причем их свойства можно настраивать путем изменения их морфологии. Среди таких структур интерес представляют ячеистые материалы на основе графеновых нанолент. Идея создания такой морфологии довольно проста и основана на морфологии самого графена - атомов углерода, расположенных в гексагональной решетке. Как было показано экспериментально, эти структуры устойчивы и могут быть получены на основе графита. Одним из важных преимуществ аэрогелей является высокая емкость сорбции водорода, что позволяет прогнозировать их использование при хранении и транспортировке водорода. Ожидается, что их механические, проводящие и сорбционные свойства также будут интересны с практической точки зрения.

В настоящей работе влияние структурных особенностей на устойчивость углеродной ячеистой структуры исследуется методом молекулярной динамики (МД). Моделирование проводится для изучения деформационного поведения этой структуры.

Методы. Все структуры и их свойства были изучены с использованием пакета программ LAMMPS, где взаимодействие между атомами углерода описывается потенциалом межатомного взаимодействия AIREBO [1]. Данный потенциал хорошо апробирован и активно применяется для изучения углеродных структур ранее [2, 3]. Все исследования проводились при температуре близкой к 0 К. Постоянство температуры поддерживалось с помощью термостата Носе-Хувера.

Расчетные ячейки создаются с помощью специально разработанной программы, которая позволяет комбинировать наноленты в необходимую структуру с определенными параметрами такими как: угол наклона, размер стороны ячейки, ширина наноленты. При построении ячейки моделирования использовались следующие параметры, предложенные в работе [4], где исследуются материалы-ауксетики (т.е. материалы с отрицательным коэффициентом Пуассона). Данная конфигурация была выбрана для того, чтобы исследовать ауксетичность таких ячеистых структур на основе реального материала – графеновых нанолент.

Можно выделить несколько основных параметров структуры – длину боковой стенки l , длину нижних и верхних стенок h (вытянут вдоль направления x), угол наклона между ними θ , ширину структуры a (вдоль направления y), которая в значительной мере может повлиять на результаты моделирования. В соответствии с предложенными в работе [4] параметрами, можно рассмотреть следующие варианты: значения угла θ (30° , 45° и 60°) и соотношения l/h ($1 \times 1,8$), ($1 \times 2,5$), (1×2) соответственно.

Для исследования были выбраны структуры с наиболее благоприятным соотношением

сторон ячейки и угла наклона: для угла наклона $\theta = 30^\circ$ наилучшее соотношение сторон $l/h = 0.55$, для угла $\theta = 45^\circ$, $l/h = 0.4$, и для угла $\theta = 60^\circ$, $l/h = 0.5$. Соответствующим образом были подобраны параметры для других типов структур. Для создания ячеистой структуры была выбрана углеродная нанолента типа «кресло». В результате получается смешанная sp^2+sp^3 -гибридная структура, где атомы на краях имеют sp^3 -гибридизацию, а атомы внутри стенок ячейки имеют sp^2 -гибридизацию.

Граничные условия периодические, размер ячейки моделирования $70 \times 14 \times 60 \text{ \AA}$ по x , y и z , соответственно. На рисунке 1 показан пример ячеистых структур, исследованных в данной работе. Далее они будут обозначены как А (а,б), Б (г,д) и В (е,ж).

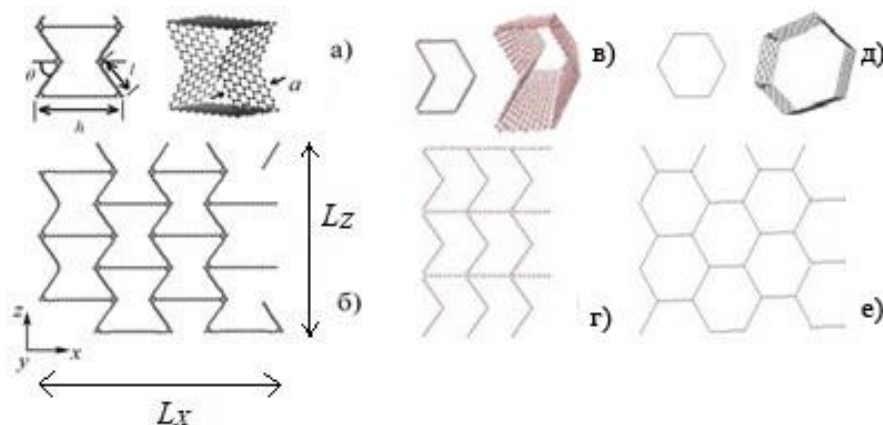


Рис. 1 Примеры ячеистых структур: (а), (в), (д) элементарная ячейка в проекции на плоскость xz и в перспективе, (б), (г), (е) использованная в работе ячейка периодичности в проекции на плоскость xz

Сначала структура минимизируется за 20 пс до равновесного состояния с минимальной потенциальной энергией при температуре 1 К. Используется термостат Хосе-Хувера. Для изучения деформационного поведения одноосное растягивающее напряжение σ_x (σ_z) прикладывается к конструкции вдоль осей x или z и вычисляются соответствующие компоненты напряжения σ_z (σ_x). Рассмотрен диапазон скоростей удлинения ϵ от 2 \AA/пс до 0.1 \AA/пс . Компонент напряжения σ_z для растяжения вдоль оси z и σ_x для растяжения вдоль оси x линейно изменяется в процессе деформации. Следовательно, σ_z (σ_x) и σ_y не представлены.

Результаты. На рисунке 2 показана зависимость напряжения σ_x как функция времени для 1 \AA/пс и 0.1 \AA/пс . Как видно из рисунка 2, в течение первых 2 пс происходит резкое увеличение напряжений σ_x , что характерно для всех скоростей деформации для структур А и В. Рост напряжений вдоль оси x до 2 пс сопровождается небольшим уменьшением размера ячейки по оси z , что означает процесс релаксации. Структура в проекции на плоскость xz в процессе деформации также показана на графике. При высоких скоростях деформации (1 \AA/пс) структура А растягивается равномерно, в то время как при малых скоростях деформации (0.1 \AA/пс) происходит трансформация структуры - неравномерное изменения размера ячеек. При скорости 0.1 \AA/пс учитываются как ковалентные, так и ван-дер-ваальсовы взаимодействия, поскольку атомы в более медленном режиме могут легко взаимодействовать с соседями, близкими к структурной релаксации. Можно сделать вывод, что при слишком высоких скоростях деформации такой релаксации не происходит, что влияет на конечный результат. В результате можно получить структуру с требуемыми параметрами (равномерно или неравномерно растянутые ячейки).

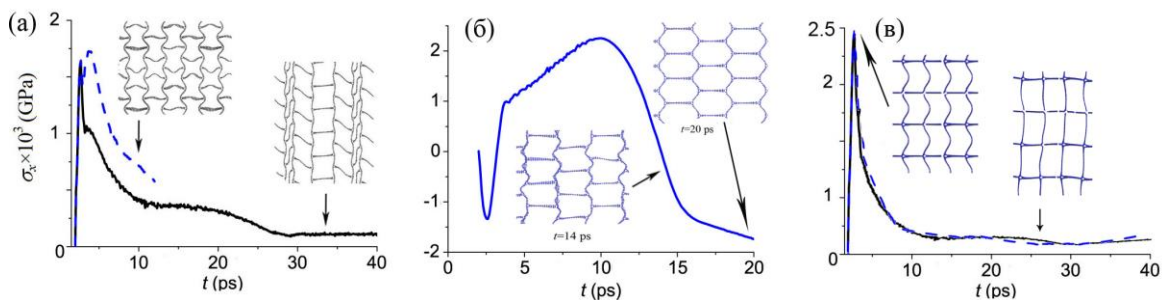


Рис. 2 Напряжение σ_x как функция времени при скорости деформации $0,1 \text{ \AA/ps}$ (черная сплошная линия) и 1 \AA/ps (синяя пунктирная линия) для трех структур.

Выводы. Методом молекулярной динамики были исследованы новые ячеистые углеродные структуры на основе графеновых нанолент. В ходе исследования было замечено, что деформируемость структуры зависит от скорости деформации. При слишком высоких скоростях деформирования происходит формирование равномерно растянутых ячеек, в то время как медленное деформирование приводит к перераспределению напряжений в структуре и формированию полосчатой морфологии, где узкие ячейки сменяются широкими, равномерно растянутыми ячейками.

Литература

1. S. Stuart, A. Tutein, J. Harrison A reactive potential for hydrocarbons with intermolecular interactions. *Journal of Chemical Physics*, 2000. V.112. P.6472-6487.
2. Л.Х. Рысаева, Ю.А. Баимова, Д.С. Лисовенко, и др. Упругие свойства фуллерита. *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2016. т. 13. вып. 1. С. 105-109.
3. Ю. А. Баимова, Р.Т. Мурзаев, С.В. Дмитриев. Механические свойства объемных углеродных материалов. *ФТТ*. 2014. т. 56. вып. 10. С. 1946-1952.
4. Grima J. N., Oliveri L., Attard D., Ellul B., Ruben Gatt Gianluca Cicala Giuseppe Recca. Hexagonal Honeycombs with Zero Poisson's Ratios and Enhanced Stiffness // *Advanced Engineering Materials*. 2010. V.12. I.9. P. 855-862

КОМПЬЮТЕРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЕЙ ИЗ СТАЛИ 12Х1МФ КОТЛА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Ковыдин С.А., Абалихина О.В.

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева
E-mail: Сера9z6@mail.ru

Проведено компьютерное моделирование процесса деформации труб пароперегревателей из стали 12Х1МФ в условиях высокого давления и повышенных температур. Установлено влияние изменения геометрии и окалинообразования в процессе эксплуатации на напряженно-деформированное состояние трубы пароперегревателя.

Введение. В настоящее время отсутствуют объективные критерии оценки остаточного ресурса труб пароперегревателей из стали 12Х1МФ котлов высокого давления, используемых в теплоэнергетике. Данные трубы эксплуатируются в условиях высокотемпературного окисления, что в свою очередь вынуждает значительно увеличить частоту вырезок с целью наблюдения за скоростью роста опасных изменений структуры и коррозионных повреждений металла. Высокотемпературное окисление не предоставляет возможности полностью использовать ресурс жаропрочности применяемых сталей, так как при выявлении коррозионных трещин менять трубы приходится за долго до исхода запаса длительной прочности.

Поэтому целью данной работы являлось разработка методики подхода для определения эквивалентного напряжения в стенке трубы пароперегревателя в зависимости от температуры, давления установки и изменения геометрии и окалинообразования в процессе эксплуатации.

Методы. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать методику построения конечно-элементных моделей образцов труб с учетом изменения геометрии и образования окалины в процессе эксплуатации.

2. Исследовать структуру и методом силовой зондовой микроскопии определить модуль упругости окалины образовавшейся в процессе эксплуатации в трубах из материала 12Х1МФ, а также рассчитать модуль упругости основного материала 12Х1МФ в условиях температуры эксплуатации.

3. Определить влияние утонения стенок труб и образования слоя окалины на напряженнодеформированное состояние материала конечно-элементной модели образца.

В качестве объекта исследования были выбраны трубы пароперегревателей из стали 12Х1МФ диаметром 32 мм, с толщинами стенок 4; 4,5; 5; 6 мм. Из труб пароперегревателей были вырезаны поперечные образцы и произведены геометрические замеры диаметра, толщины стенки и окалины образовавшейся в процессе эксплуатации.

Затем исследуемые поверхности подвергались сканированию с помощью нанотвердомера «СуперНаноСкан». В ходе измерений было установлено, что модуль упругости основного металла имеет значения от 190 до 200 ГПа, а модуль упругости окалины от 135 до 145 ГПа.

Расчеты напряженно-деформированного состояния производились методом конечных элементов, в пакете программ инженерного анализа MSC.Nastran. В данном исследовании конечно-элементная модель представляет собой четвертую часть цилиндрической трубы с заданием соответствующих граничных условий симметрии закрепления и обладающая свойствами стали 12Х1МФ.

В результате проведенного конечно-элементного анализа получены карты распределения напряжений и деформаций. При анализе картин напряженнодеформированного состояния конечно-элементной модели трубы выявлены поля повышенных напряжений, обусловленные утонением стенки и образованием окалины в процессе эксплуатации.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБ ИЗГИБЕ БАЛКИ С ТРЕЩИНОЙ В РАМКАХ ГРАДИЕНТНОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

Короленко В.А.

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Соляев Ю.О.

МАИ, Москва

E-mail: korolenko.vmir@gmail.com

Рассмотрена задача определения несущей способности балки из хрупкого материала, имеющей краевую поперечную трещину. Для решения использована градиентная теория упругости. Решение задачи механики трещин в рамках градиентной теории позволяет определить конечное значение максимального напряжения, действующего в окрестности вершины трещины, что делает возможным определение коэффициента концентрации напряжений. Таким образом, при оценке несущей способности тела с трещиной применим традиционный критерий прочности. В решение входит масштабный параметр, который, как и критический коэффициент интенсивности напряжений в механике разрушения, определяется из эксперимента.

Проведены испытания на трехточечный изгиб образцов с несимметричной краевой поперечной трещиной. Образцы изготовлены из эпоксидной смолы. С помощью фрезерного станка с ЧПУ, тонким алмазным диском на образцы нанесены предварительные надрезы. Затем, в вершине надреза создана искусственная трещина с помощью бритвенного лезвия. Измерение длины трещины осуществлялось с помощью оптического микроскопа. Испытания проводились на разрывной машине с применением оснастки для трехточечного изгиба. По полученным из эксперимента величинам разрушающей нагрузки, в рамках линейной механики разрушения определен критический коэффициент интенсивности напряжений. Также определены величины масштабного параметра. Из решения в рамках градиентной теории упругости найден коэффициент концентрации напряжений и оценена несущая способность балки. Полученные данные позволяют сравнить решение, полученное с помощью обобщенной теории упругости с решением, полученным в рамках линейной механики разрушения и с экспериментальными данными.

ЭЛЕКТРОННЫЙ БЛОК ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДЕСУЛЬФАТОРОМ СВИНЦОВО-КИСЛОТНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Косарева М.А.

Научный руководитель — доцент, д.т.н. Лебедев В.В.

МАИ, Москва

E-mail: Milena.kosareva.04@bk.ru

Нерешённой технической проблемой является сульфатация кислотно-свинцовых аккумуляторов. С позиции химии процесс сульфатации объясняется взаимодействием свинца в аккумуляторных пластинах с концентрированной серной кислотой. В результате на пластинах образуется диэлектрик сульфат свинца $PbSO_4$, который препятствует прохождению электрического тока не только во время разряда аккумуляторной батареи, но и в процессе зарядки. Получается, что сульфатированный аккумулятор нельзя зарядить, поэтому его приходится утилизировать или просто выбрасывать, а взамен покупать новый. Причин сульфатации аккумулятора много, но главная – хранение в разряженном пассивном состоянии. В автомобильной технике аккумулятор в среднем работает надёжно 3-5 лет, а потом начинает давать сдои, в том числе из-за сульфатации. Цена нового аккумулятора колеблется от трёх до пяти тысяч рублей. Есть организации, которые восстанавливают сульфатированные аккумуляторы, но проще и дешевле купить новый. Сами автомобилисты обычно не занимаются десульфатацией из-за сложности процесса. Особенно сложна для обычных автолюбителей электронная схема и электронный метод этого процесса.

Импульсный метод десульфатации свинцово-кислотного аккумулятора предложен в научной статье в журнале «Электрохимическая энергетика». По этой актуальной проблеме есть много научных работ, но эффективного метода борьбы с сульфатацией свинцово-кислотных аккумуляторов не найдено.

Первой задачей моей научно-исследовательской работы стал анализ электронной схемы десульфатора. В этой схеме пять основных блоков.

Первый блок – это двухполупериодный выпрямитель на основе диодного моста с очень мощным ёмкостным фильтром от пульсаций выпрямленного электрического тока. Общая электроёмкость фильтра равна 4400 мкФ, то есть 4,4 мФ. Радиотехники обычно применяют грубые правила расчётов, выработанные за долгое время практики. Вот одно из таких правил: если нужно сгладить пульсации выпрямленного тока силой 1 мА, то для этого требуется ёмкостной фильтр 1 мкФ. Применённый автором ёмкостной фильтр спокойно можно применять при скачках силы тока десульфатации и заряда до 4,4А.

Второй блок – это устройство стабилизации напряжения питания микросхемы-таймера серии 555 на основе микросхемы серии 7812, обеспечивающей стабилизацию выходного напряжения 12В при скачках входного напряжения после диодного моста и ёмкостного фильтра от 12В до 18В. Эту схему можно заменить аналогом КРЕН.

Третий блок – это микросхема-таймер серии 555. Это тактовый генератор коротких импульсов напряжения. Частота импульсов обеспечивается управляющим резистором 220К, а длительность импульсов определяется конденсатором 10нФ. Этот резистор и этот конденсатор стали объектом моего исследования, а предметом изучения стали характеристики выходных импульсов микросхемы-таймера серии 555.

Четвёртый блок – это радиодетали, обеспечивающие заданный режим работы микросхемы-таймера серии 555, которые я изучаю особенно подробно. Это блок управления таймером

Пятый блок – это мощный силовой полевой транзистор-коммутатор типа IRFZ44N.

Таким образом, я определила для себя основное направление исследования – характеристики блока управления таймером.

Лабораторная установка была подготовлена к исследованиям. Для достижения цели работы сначала мне надо было решить две задачи.

1. Определить зависимость частоты следования импульсов десульфатора от управляющего сопротивления, которое можно удобно изменять на лабораторной установке декадными переключателями от 0 до 1000К практически с любым шагом, вплоть до 0,1 Ом.

2. Определить зависимость длительности одиночного импульса десульфатора от

величины ёмкости конденсатора, которую можно удобно изменять на лабораторной установке от 0 до 10 мкФ с шагом 10 нФ. Это грубо, нужен меньший шаг изменения ёмкостей, но на первом этапе исследования приемлемо.

3. Определить основные особенности переходных процессов в импульсах и сформировать требования к этим процессам, чтобы не нарушить работоспособность микросхемы-таймера серии 555.

4. Сделать выводы по экспериментальным данным, представить результаты исследований в иллюстративной форме.

Частотные характеристики позволили определить требуемое сопротивление реостата. Расчётный режим работы с частотой 30 кГц будет при сопротивлении 15 кОм. Менее 10 кОм сопротивление реостата нет смысла делать, потому что частота превысит 40 кГц. Более 30 кОм сопротивление делать не надо, потому что увеличивается скважность сигнала и уменьшается коэффициент заполнения, то есть сигнал постепенно перестаёт быть различимым, поэтому его влияние на десульфатацию уменьшится. В десульфаторе достаточно регулировать сопротивление реостата от 10 кОм (частота 40 кГц) до 30 кОм (частота 17 кГц). Более детально был изучен расчётный режим работы десульфатора на частоте 30 кГц, как в прототипе.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВЫДАВЛИВАНИЯ РОЛИКОВ ИЗ НЕСКОЛЬКИХ ПРУТКОВЫХ ЗАГОТОВОК

Крутиков П.В., Самсонов Н. А.

Научный руководитель — проф., д.т.н. Ларин С.Н.

ТулГУ, каф. МПФ

E-mail: Peter212@yandex.ru

Выдавливание является одной из наиболее прогрессивных и технологичных операций в сфере обработки металлов давлением. В настоящее время качественное развитие указанного способа металлообработки является приоритетной задачей технологов, конструкторов и ученых, занимающихся проблемами оптимизации и развития промышленного комплекса страны.

В ходе исследований было установлено, что одним из важнейших факторов, влияющих на экономическую эффективность процесса выдавливания, является возможность существенно расширить номенклатуру получаемых за одну операцию деталей. Обнаружено, что крайне мало технологических решений, опирающихся на использование процесса выдавливания (в частности холодного выдавливания), могут предложить нам получение деталей с относительной высотой (отношения высоты заготовки к ее диаметру) более 2. Заметим, что традиционные способы холодного выдавливания тонкостенных заготовок не позволяют получать детали типа «ролик» без введения в технологический процесс дополнительной операции. Разработка технологии выдавливания роликов из нескольких прутковых заготовок позволит получать детали с улучшенными механическими характеристиками с существенным экономическим эффектом.

На базе кафедры МПФ в Тульском государственном университете была разработана и опробована технология получения роликов холодным выдавливанием с применением нескольких заготовок в одной операции. Экспериментальные исследования проводились на гидравлической разрывной машине с использованием универсальной штамповой оснастки, позволяющей за короткий промежуток времени менять конфигурацию инструмента, что дало возможность построить статистическую модель для предлагаемой технологии выдавливания.

Важно отметить, что проведенные исследования позволяют разработать универсальный технологический процесс получения роликов из прутковых заготовок без применения операций отрезки или пробивки дна. Испытания проводились с использованием медных, латунных, алюминиевых и оловянных заготовок. В ближайшее время планируется проведение полноценного эксперимента с использованием в качестве материала для заготовок конструкционных сталей.

Суть предлагаемого технологического процесса заключается в одновременном деформировании двух и более заготовок, что позволит получать детали типа «ролик» при деформировании первой заготовки второй. Крайне важно правильно учитывать скоростно-силовые параметры при выдавливании, а так же геометрию инструмента.

Подобные технологии позволят добиться значительного экономического эффекта в различных отраслях промышленности, в том числе и в авиационной. Совершенствование способов холодного выдавливания металлов является важной технико-экономической задачей представляемой работы.

БАЛОЧНЫЙ МИКРОКАНАЛЬНЫЙ РЕЗОНАТОР КАК ДЕТЕКТОР МАССЫ НАНОЧАСТИЦ В ПРОТЕКАЮЩЕМ ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ

Ледовская Ю.С.

Научный руководитель — Лукин А.В.

СПб Политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

E-mail: ledovskaja.julia@yandex.ru

Одним из интенсивно развивающихся направлений применения нано- и микросистемной техники (НМСТ) является создание аналитических систем для исследования биологических объектов в естественном состоянии. Ключевыми элементами подобных систем являются микрофлюидные устройства, используемые для манипуляции микро- и нанообъектами в каналах с жидкостью. Развитие микрофлюидики привело к появлению приборов, в которых осуществляется воспроизводимое управление нано- и пиколитровыми объемами жидкости [1]. Одной из важных функций микрофлюидных чипов является определение массы нано- и микрочастиц [2,3]. Для достижения этой цели могут быть использованы микроканальные резонаторы, осуществляющие упругие колебания при управляемом внешнем возбуждении. В настоящей работе выполняется построение и исследование математической модели балочного микроканального резонатора с электростатическим принципом возбуждения колебаний, предназначенного для определения массы наночастиц, движущихся в потоке протекающей по каналу резонатора жидкости. Выводятся уравнения нелинейных колебаний резонатора, учитывающие его распределенную упругость; наличие кориолисовых и центробежных сил, действующих на резонатор со стороны протекающей жидкости; сосредоточенную инерционную нагрузку со стороны наночастицы, а также пондеромоторные силы электростатического возбудителя колебаний. Для качественного изучения задач динамики и устойчивости рассматриваемой связанной электрогидроупругой системы используются методы модальной дискретизации нелинейных распределенных систем, а также численные методы теории бифуркаций. Исследуется задача о малых колебаниях резонатора в окрестности нетривиального положения равновесия. Определяется зависимость собственных частот резонатора от скорости потока жидкости, величины и расположения наночастицы в канале, силы электрического поля. Исследуется проблема упругой устойчивости резонатора при наличии неконсервативных сил. Предлагается алгоритм определения массы наночастицы по регистрируемым изменениям спектральных свойств системы.

Литература

1. Кухтевич И.В. Микрофлюидные чипы для исследования биологических объектов методами микроскопии высокого разрешения. Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2012. №1 (77).
2. Zhang Wen-Ming et.al. A measurement criterion for accurate mass detection using vibrating suspended microchannel resonators. Journal of Sound and Vibrations. 2017. № 403.
3. Wang Lin et. al. Vibration analysis of suspended microchannel resonators characterized as cantilevered micropipes conveying fluid and nanoparticle. Microsystem Technologies. 2019. № 25.

ИЗМЕНЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ДЕТАЛИ В ПРОЦЕССЕ ВЫТЯЖКИ

Манаенков Д.А., Ипполитов А.О.

Научный руководитель — доцент, к.т.н. Типалин С.А.

Московский Политех

E-mail: kosmach00@gmail.com

Вытяжки деталей является одной из самых распространенных операций. При этом в процессе вытяжки происходит изменение толщины материала [1, 2]. Изменение толщины имеет неравномерный характер. Утонение материала наблюдается на донной части заготовки и цилиндрической [3, 4]. Наибольшее утонение наблюдается при переходе торового участка к цилиндрическому. Однако на фланце заготовку происходит увеличение толщины, в связи с тем, что окружные деформации происходит очень интенсивно и часть материала, которая не успевает перетечь в радиальном направлении и возникает увеличение толщины материала.

Как показывает практика, упрочнение материала зависит от интенсивности деформации. При этом согласно теории единой кривой упрочнение связано с деформацией по одному закону, как для растяжения, так и для сжатия.

В связи с этим, зная какую деформацию претерпела любая материальная точка, можно получить изменение ее свойств в условиях упрочнения материала [4].

Особенно интерес представляет изменение свойств материалов при утонении отдельных участках. При этом нужно учитывать, что при деформации, часто имеют место конкурирующие тенденции:

- Материал утоняется в процессе деформации;
- Материал упрочняется в процессе деформации.

В результате для эксплуатации нужно знать на сколько изменится прочность конструкции в процессе формоизменения деталей в штампе при холодной пластической деформации.

Вычисляя интенсивность деформации на каждом участке и численно определяя утонения материала получили зависимость максимальной силы при которой прочность конструкции может нарушиться. Получено, что не смотря на утонения металла в детали в виде цилиндрического стаканчика, прочность изделия из-за упрочнения повышается.

Литература

1. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. 6-е изд – Л.: Машиностроение, 1979.
2. Шпунькин Н.Ф., Типалин С.А. Технологичность штампованных листовых деталей / Учебное пособие. – М. Университет машиностроения, 2015- 72 с.
3. Шпунькин Н.Ф., Типалин С.А. Основы расчета параметров штамповки листовых деталей и оценка их технологичности / Учебное пособие: – М. Университет машиностроения, 2016- 186 с.
4. Типалин С.А. Шпунькин Н.Ф., Никитин М.Ю., Сапрыкин Б.Ю. Типалина А.В. Штамповка детали типа «кожух» из шумопоглощающего материала / Материалы 65-ой Международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров (ААИ) "Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров" Международного научного симпозиума «Автотракторостроение – 2009». Книга 6, Москва, МГТУ «МАМИ», 2009 г. С.90-95.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОРОБЛЕНИЯ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ ПРИ ЧЕКАНКЕ ГАЛТЕЛЕЙ

Мирзахамдамов О.М., Емельянов В.Н.

НовГУ

E-mail: odiljon1994@bk.ru

Описана компьютерная программа, с помощью которой возможно рассчитать величину и направление коробления коленчатого вала.

Коленчатые валы (КВ) широко применяются в современном машиностроении. Однако, несмотря на большой опыт, накопленный специалистами в конструировании, изготовлении и эксплуатации КВ, они нередко разрушаются в эксплуатации из-за недостаточного запаса сопротивления усталости. По данным проф. В. П. Ускова, такое разрушение наблюдается у 2-8% двигателей, поступающих в ремонт. Разрушение происходит, главным образом, по галтелям. Наиболее эффективна и просто осуществима с точки зрения повышения сопротивления усталости КВ операция упрочнения их галтелей поверхностным пластическим деформированием (ППД): накатыванием роликами, чеканкой и др. Однако, как показывает практика и многочисленные эксперименты, упрочнение галтелей КВ ППД приводит к короблению КВ. Причем, чем эффективнее способ с точки зрения повышения сопротивления усталости, тем к большему короблению коленчатого вала он приводит. С интенсификацией режимов упрочнения увеличивается сопротивление усталости коленчатого вала, однако вместе с тем увеличивается и величина его коробления.

На кафедре технологии машиностроения НовГУ разработаны основные положения теории коробления КВ при упрочнении их галтелей ППД. В частности, проведены теоретическое, экспериментальное и компьютерное исследования процесса коробления пространственных коленчатых валов с шестью шатунными шейками (ШШ), которые попарно расположены под углами 120° [2], и с пятью ШШ, расположенными под углом 72° друг к другу [1]. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование процесса коробления КВ с одной ШШ при ударной чеканке галтелей и разработка компьютерной программы, адекватно описывающей этот процесс.

В качестве объекта исследования выбран КВ, который имеет одну ШШ диаметром 47,2 мм. Диаметр коренных шеек (КШ) равен 50,5 мм. Радиус кривошипа $r = 40,15$ мм. Щеки вала имеют толщину 20,5 мм (слева) и 19 мм. Радиус галтелей КШ равен 2,5 мм, радиус галтелей ШШ – 2 мм. Расстояние между опорами $L = 95,5$ мм. Материал – высокопрочный чугун ВЧ 45.

Эксперименты проводились при последовательной чеканке галтелей. Галтели обрабатывались вручную с помощью бойка со сферической головкой (диаметр сферы – 4 мм) и молотка массой около 800 г в последовательности 1 – 2 – 3 – 4. Величина и направление вектора биения КВ измерялись после обработки каждой галтели с помощью индикатора. Величина и направление вектора коробления КВ от обработки каждой галтели подсчитывались как разность векторов биений после и до обработки данной галтели. Перед началом эксперимента исходное биение КВ $\delta_{исх}$ составляло (+0,05) мм. После ударной чеканки галтелей 1 – 4 окончательное биение КВ $\delta_{кон}$ составило (+ 0,01) мм. Суммарная величина коробления КВ после чеканки всех четырех галтелей $\delta_{сумм}$ составила 0,04 мм.

По результатам эксперимента была построена экспериментальная эпюра коробления КВ, которая показана на рис. 1. По оси ординат с помощью значков «●» показаны экспериментальные значения величины коробления КВ (с помощью значков «Х» показаны расчётные значения величины коробления).

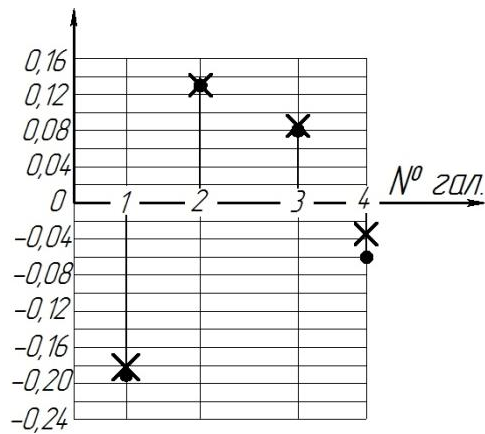


Рис. 1. Эпюра коробления КВ

На основе теоретических представлений о процессе коробления КВ разработана компьютерная программа на языке С# (C Sharp) с использованием среды программирования Microsoft VisualC# 2017 Express.

В рабочее окно описанной программы были введены характеристики КВ, а также режимы ручной чеканки. Расчётная суммарная величина коробления КВ после чеканки всех четырех галтелей $\delta_{\text{сумм}} = -0,06$ мм. Эпюры экспериментальных и расчётных (теоретических) величин коробления КВ в зависимости от расстояния галтелей до опор, т. е. от номера галтели, приведены на рис.1. Несовпадение экспериментальных и теоретических точек составляет в среднем 14%. Результат можно признать удовлетворительным с учетом того, что чеканка галтелей осуществлялась вручную. При ручной чеканке выдержать ее режим неизменным (энергию удара, шаг пластических отпечатков) при обработке различных галтелей практически невозможно. Следовательно, разработанная программа удовлетворительно описывает процесс коробления КВ.

Таким образом, после ударной чеканки всех четырёх галтелей КВ возникает значительное (недопустимое) коробление. Очевидно, необходимо обработать галтели с различными режимами чеканки, подобрав их комбинацию таким образом, чтобы свести величину суммарного коробления КВ к возможному минимуму. С помощью описанной программы была выбрана следующая комбинация: галтель 1 – $\mathcal{E}_y=20$ Дж; галтель 2 – $\mathcal{E}_y=40$ Дж; галтель 3 – $\mathcal{E}_y=40$ Дж; галтель 4 – $\mathcal{E}_y=20$ Дж. При такой комбинации величина суммарного коробления КВ $\delta_{\text{сумм}}$ составила около 0,01 мм, что является приемлемым.

Таким образом, с помощью разработанной компьютерной программы возможно следующее:

а) еще на стадии проектирования операции упрочнения галтелей КВ ударной чеканкой рассчитать ожидаемые величину и направление коробления, а также подобрать такую комбинацию режимов упрочняемых галтелей, при которой величина суммарного коробления будет минимальна;

б) производить компьютерное исследование влияния различных факторов на величину коробления КВ с одной шатунной шейкой с любой комбинацией размеров их конструктивных элементов и из любого металла, что в принципе невозможно исследовать экспериментально.

Литература

1. Емельянов В.Н., Костин П.В. Компьютерное моделирование процесса коробления пространственных коленчатых валов с пятью шатунными шейками // Вестник НовГУ. – 2013.– №75. – Т.1. – С. 64 – 67.
2. Емельянов В.Н., Романов И.В. Коробление пространственных коленчатых валов при чеканке галтелей // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано до макроуровня: Мат. 13-й Междунар. науч. практ. конф. В 2 ч. Ч.2. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. С.118-121.

ВЛИЯНИЕ АДГЕЗИИ ПРИ КАЧЕНИИ ЦИЛИНДРА ПО ВЯЗКОУПРУГОМУ СЛОЮ

Мифтахова А.Р.^{1,2}

Научный руководитель: академик РАН, д.ф.-м.н. Горячева И.Г.

¹МФТИ

²ИПМех РАН

E-mail: mif-almira@yandex.ru

Рассматривается плоская задача о качении жёсткого цилиндра по основанию, состоящему из вязкоупругого слоя и жёсткой полуплоскости. Вязкоупругий слой в нормальном и касательном направлениях моделируется телом Кельвина. Учитываются силы адгезионного притяжения на входе и выходе из области контакта, для описания адгезии в этих зонах используется полная форма межмолекулярного потенциала Леннарда-Джонса. Целью работы является изучение влияния скорости качения цилиндра и характеристик вязкоупругого слоя на распределение нормального и касательного напряжений в области контакта и адгезионного взаимодействия.

Процесс движения цилиндра считаем установившимся. При качении область контакта цилиндра и основания делится на зоны сцепления и проскальзывания. Нормальные и касательные перемещения связаны с соответствующими напряжениями с помощью соотношений для одномерной модели Кельвина. В работе предлагается метод расчёта распределения нормального и касательного напряжений в области контактного взаимодействия. Проводится анализ влияния адгезии и свойств вязкоупругого слоя на распределение нормального и касательного напряжения в области контакта, а также на конфигурацию области контакта.

Для решения поставленной задачи используется метод определения нормальных и касательных напряжений, ранее описанный в [1,2]. В [3] рассмотрена задача о скольжении индентора по вязкоупругому основанию и проведено исследование влияния адгезионных свойств поверхностей на контактные характеристики и силу трения. Для описания молекулярного взаимодействия поверхностей была использована модель Мажи-Дагдейла. Взаимодействие индентора и упругого основания с адгезионным потенциалом произвольной формы было рассмотрено в [4].

Построена модель качения жёсткого цилиндра по вязкоупругому слою, сцепленному с основанием, с учётом адгезионного взаимодействия поверхностей, описанного с помощью потенциала в форме Леннарда-Джонса. Получены распределения нормальных и касательных перемещений точек поверхности вязкоупругого слоя и определена конфигурация области непосредственного контакта и адгезионного взаимодействия.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-31-00441).

Литература

1. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия // Москва: Наука. 2001. С. 480.
2. Мифтахова А.Р. Контактные задачи о качении с проскальзыванием для вязкоупругих тел // Трение и износ. 2018. Т. 39, № 1. С. 71–79.
3. Горячева И.Г., Губенко М.М., Маховская Ю.Ю. Скольжение сферического индентора по вязкоупругому основанию с учётом сил молекулярного притяжения рикладная механика и техническая физика. 2014. № 1. С. 99–107.
4. Маховская Ю.Ю. Моделирование взаимодействия индентора с упругим полупространством при наличии адгезионного притяжения произвольного вида // Трение и износ. 2016. № 4. С. 393–400.

СНИЖЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ СТАНКА ЗА СЧЕТ РАЦИОНАЛЬНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Михрютин А.В.

Научный руководитель — доцент, к.т.н. Михрютин В.В.

РГАТУ им. П.А.Соловьёва, Рыбинск

E-mail: sachom@yandex.ru

В современном машиностроении широкое распространение получили станки-обрабатывающие центры, в частности, токарные обрабатывающие центры, концентрирующие на одном станке операции точения, сверления, фрезерования и другие. Значительная часть рабочих органов станков совершает прямолинейные движения. Поэтому исследования в области конструирования таких приводов представляют значительный интерес.

В приводах линейного перемещения станков наиболее перспективно использовать линейные двигатели, однако ввиду их дороговизны, распространение получили синхронные двигатели вращения с механическими передачами, преобразующими вращательное движение в поступательное. Используются, например, передачи зубчатым ремнем, зубчатые реечные передачи и шарико-винтовые пары (ШВП). Для привода вращения в таких передачах используются в основном синхронные электродвигатели. Большинство синхронных электродвигателей работает в режиме самоохлаждения. При этом всё выделившееся тепло рассеивается через корпус электродвигателя. Значительная доля тепла отводится также через фланец электродвигателя и передается в станину. Для снижения нагрева станины ряд станкостроителей используют принудительное охлаждение корпусных деталей, например, компания Mori Seiki использует винты ШВП с осевым отверстием, через которое прокачивается охлаждающая жидкость. Охлаждающая жидкость прокачивается через опоры винта, винт и корпусную деталь, к которой присоединяется электродвигатель, тем самым предотвращая распространение тепла по корпусным деталям станка. У некоторых компаний реализована корректировка управляющей программы на основе измеренных температурных деформации и вносят.

При создании нового станка необходимо стремиться снизить температурные деформации за счет рационального расположения электродвигателей приводов подач. Исследования проводили для станка предложенной конструкции.

Ряд известных конструкций токарных обрабатывающих центров обладает недостаточной жесткостью. Поэтому был предложен токарный обрабатывающий центр новой конструкции. Предложенный токарный обрабатывающий центр состоит из станины с продольными линейными направляющими оси Z, на которых установлен суппорт. Суппорт имеет поперечные линейные направляющие поперечных салазок оси X. Привод линейных перемещений суппорта и поперечных салазок осуществляется электродвигателями. На поперечных салазках смонтирован привод поворота шпиндельной инструментальной головки вокруг круговой оси В. В шпинделе инструментальной головки устанавливается инструмент.

Станина имеет так же дополнительные линейные направляющие оси Y, расположенные перпендикулярно линейным направляющим станины, а также линейным направляющим суппорта. В дополнительных линейных направляющих установлена шпиндельная бабка со шпинделем, на котором закреплен кулачковый патрон. Вращение шпинделя осуществляется относительно управляемой оси С. Геометрическая ось шпинделя S параллельна продольным линейным направляющим станины. В патроне закреплена обрабатываемая деталь. Привод линейных перемещений шпиндельной бабки осуществляется электродвигателем. Станок снабжен устройством автоматической смены инструмента, а также устройством числового программного управления, системами охлаждения, смазки и удаления стружки. Приводы вращения шпинделей интегрированы в конструкции шпиндельной инструментальной бабки и шпиндельной бабки соответственно.

Целесообразно расположить электродвигатель со стороны фиксирующей опоры как можно ближе к нулевой точке станка.

Возможны два варианта установки электродвигателей для осей Y и Z. По оси X возможен только один вариант установки электродвигателя. Для выяснения влияния температурных деформаций на точность станка при разных расположениях электродвигателей были проведены вычисления. Расчеты показали, что целесообразно применять принудительное охлаждение электродвигателей.

Расчеты показали, что в условиях естественного охлаждения изменение расположения двигателя может снизить суммарное смещение вследствие температурных деформаций на 26%.

В результате проведенной работы предложена новая конструкция токарного обрабатывающего центра, на которую подана заявка на изобретение. Расчет конструкции по методу конечных элементов позволил выбрать наиболее рациональную конструкцию.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИИ ФОТОСНИМКОВ ИХ ПОВЕРХНОСТИ С УЧЕТОМ РЕЛЬЕФА

Моргунова А.А.

Научный руководитель – проф., д.ф.-м.н. Рабинский Л.Н.
Московский авиационный институт, кафедра 902
E-mail: iv.morgunov@yandex.ru

Важнейшей задачей в области механики является исследование авиационных материалов и их характеристик. Для изучения механизмов деформации материалов применяются различные методы. Одним из них является оптический метод корреляции цифровых изображений, основанный на анализе фотоснимков.

В работе исследованы процессы деформации растяжения металлических образцов из алюминия и алюминиевых сплавов. Исследование проводилось в комплексе и состояло из последовательных инструментальной и алгоритмической стадий: подготовки-испытаний, а также оценивания механических параметров образцов по цифровым фотоснимкам их поверхности методом корреляции изображений. Физический эксперимент проводился на электромеханической машине Instron 5985 и заключался в одноосном статическом растяжении и разрыве металлических образцов. При этом регистрировались диаграммы зависимости удлинения образца от действующего усилия, проводилась фотосъемка поверхности образца до, в процессе и после нагружения при равных условиях положения и освещения. Рельеф поверхности учитывался по данным измерений параметров шероховатости (Ra , Rz) в продольном и поперечном направлениях соответственно по 3-м и 5-и маркированным участкам. С помощью матрицы площадных корреляций цифровых изображений по областям поиска определены перемещения эталонных участков внутри каждой из этих областей, сформировано соответствующее векторное поле. Методом корреляции цифровых изображений проведен анализ изменения полей деформаций по рельефу образца, а также оценена степень деформации. Сопоставление графиков измеренных параметров шероховатости и среднего квадратичного отклонения интенсивности изображения по маркированным направлениям показало сильную корреляционную зависимость рассматриваемых зависимостей.

На основе метода корреляции изучена деформация растяжения металлических образцов авиационных материалов: сформированы алгоритмы построения векторного поля перемещений, оценки компонент тензора дилатации и интенсивности деформации сдвига, установлена статистически значимая взаимосвязь рельефа поверхности испытуемого образца с интенсивностью ее изображения на фотоснимках. Продолжение исследований представляется в установлении зависимости оценок компонент интенсивности деформаций сдвига, полученных методом корреляции цифровых изображений, с параметрами микротвердости.

Литература

1. Астапов А.Н., Бодрышев В.В., Моргунова А.А. Методы анализа структуры материала с применением цифровой обработки изображения // Тезисы докладов V Международного научного семинара «Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы». –М.: МАИ, 2016, стр.18–21.
2. Бодрышев В.В., Моргунова А.А. Метод цифровой обработки изображений для идентификации размеров и концентраций фаз композиционных материалов // Тезисы докладов XLIII Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения – 2017» – М.: МАИ, 2017, стр.348.
3. Бодрышев В.В., Моргунова А.А. Оценивание геометрических характеристик наноразмерных частиц оксидов металлов методом цифрового анализа изображений // Тезисы докладов 16-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика — 2017» –М.: МАИ, 2017, стр. 467–468.
4. Булычев Н.А., Казарян М.А., Ерохин А.И., Аверюшкин А.С., Рабинский Л.Н., Бодрышев В.В., Гарибян Б.А. Анализ структуры адсорбционных слоев полимеров на поверхности микрочастиц

- оксидов металлов с применением цифровой обработки изображений // Технология металлов. – 2018. – Т. 9. – С. 39–47.
5. Содушкин А.И., Кибиткин В.В., Плешанов В.С. Модифицированный алгоритм расчета поля векторов смещений для оценки деформации // Известия ТПУ. – Томск: 2011. – Т. 318, № 5: Управление, вычислительная техника и информатика. — С. 48-51.
 6. Филиппов А.В., Проскоков А.В. Исследование процесса стружкообразования при резании металлов методом цифровой корреляционной спекл-интерферометрии // Вестник МГТ им. Н.Э. Баумана, сер. «Машиностроение». – М.: 2014, №2. – С. 100-113.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПРИ ШЛИЦЕШЛИФОВАНИИ

Мусаров В.Е., Калашников А.С.

Московский политехнический университет

E-mail: alexandr_kalashnikov45@rambler.ru

В ответственных узлах и механизмах широко применяют валы со шлицевыми соединениями, которые могут быть треугольными, эвольвентными и прямобочными. В автомобилестроении применяют преимущественно прямобочные шлицы.

Прямобочный шлицевый вал редуктора рулевого управления автобуса ЛиАЗ 5256 обладает важной соединительной функцией, он передаёт вращение от рулевого колеса на рулевой механизм для управления колёсами автобуса. Его изготавливали из легированной низкоуглеродистой стали марки 25ХГМ. На конце вала расположены 10 прямобочных шлиц со следующими геометрическими параметрами: наружный диаметр шлиц $\varnothing 30-0,014$ мм, внутренний диаметр шлиц $\varnothing 25-0,28$ мм, толщина шлиц $4,5-0,03$ мм (рис. 1).

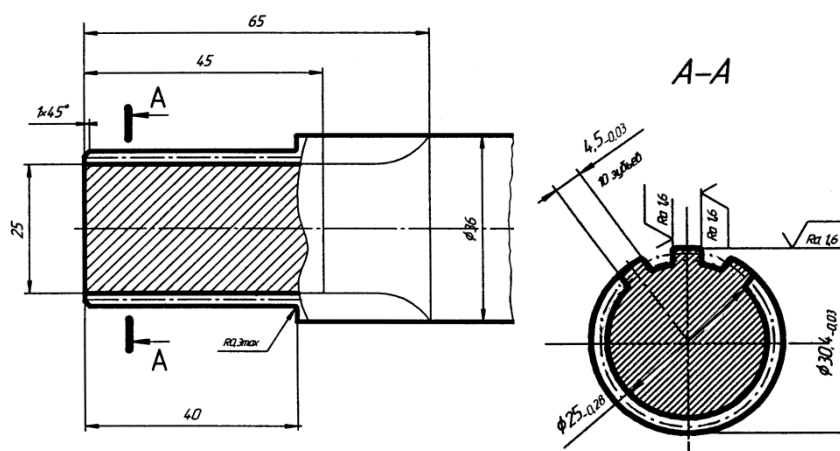


Рис. 1. Прямобочные шлицы вала редуктора рулевого управления.

Боковые поверхности прямобочных шлиц предназначены для центрирования и передачи крутящего момента. Для обеспечения плавности и равномерности передачи вращения боковые поверхности шлицев вала редуктора должны быть изготовлены с высокой точностью и допусками: на накопленную погрешность шага $F_p = 22$ мкм, предельные отклонения шага $f_{pT} = 14$ мкм, погрешность направления $F_{\beta} = 11$ мкм.

С целью получения необходимой точности после химико-термической обработки вала (цементация и закалка, твёрдость HRC 58-63, глубина цементированного слоя 1,0-1,4 мм) производили чистовую обработку только боковых поверхности прямобочных шлиц двумя шлифовальными кругами 3 и 4 на шлицешлифовальном станке мод. ВЗ-729Ф4 с ЧПУ (SINUMERIK 840 D) и горизонтальным расположением шпинделя заготовки. Заготовку 2 устанавливали в приспособлении 1 (рис. 2).

Известно, что при шлифовании около 90-92% механической мощности микрорезания благодаря трению, смятию и деформации обрабатываемого металла преобразуется в тепловую энергию. Оставшаяся часть мощности тратится на работу резания и деформацию стружки. Основной составляющей мощности микрорезания является мощность трения, которая может значительно снижаться при применении СОТС - смазочно-охлаждающих технологических средств [1].

Главной технологической задачей при шлифовании является распределение тепловых потоков таким образом, что бы количество тепла, поступающего на обрабатываемую заготовку, было минимальным. Это позволяет существенно снизить тепловую деформацию заготовки и избежать прижогов, что особенно важно при высокоскоростном шлифовании.

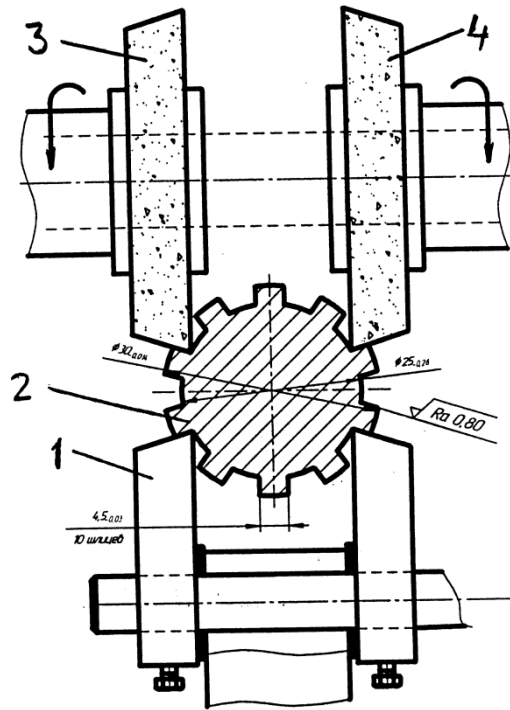


Рис. 2. Схема шлифования шлиц

Оптимальными значениями распределения тепловой энергии при шлифовании принято считать: СОТС 52-56%, стружка 23-27%, заготовка 12-16%, шлифовальный круг 3-5%, окружающая среда 2-4%. В связи с этим при шлицешлифовании большое внимание уделяли эффективному использованию СОТС [2]. На рис. 3 показана схема установки насадки 5 для подачи смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) в зону обработки при шлицешлифовании. Расстояние между концом насадки и поверхностью круга 3 строго выдерживали в пределах 1,0-1,5 мм. Чтобы избежать турбулентного движения СОЖ конструкция насадки 5 была выполнена с постоянно уменьшающейся площадью её поперечного сечения от входной к выходной части.

Поток охлаждающего средства был направлен на рабочий профиль шлифовального круга, а скорость его подачи в зону резания была приблизительно равна скорости вращения шлифовального круга 3. Это обеспечивало надёжное попадание СОЖ в зону резания шлиц заготовки 1. Для очистки шлифовального круга от микростружек и продуктов его износа на режущую поверхность круга через два очистительных сопла 2, установленных в защитном кожухе 4, подавалось охлаждающее средство под высоким давлением (1-2 МПа) [3].

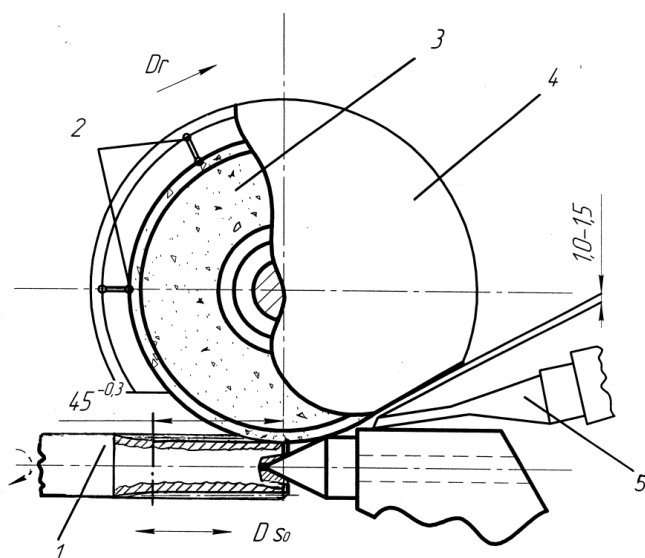


Рис. 3. Схема подачи СОТС при шлифовании шлиц.

СОЖ в зоне резания контактирует с режущей поверхностью инструмента, образующейся стружкой и обрабатываемой заготовкой, она позволяет повысить стойкость режущего инструмента, производительность обработки и улучшить качество изготовления деталей [4].

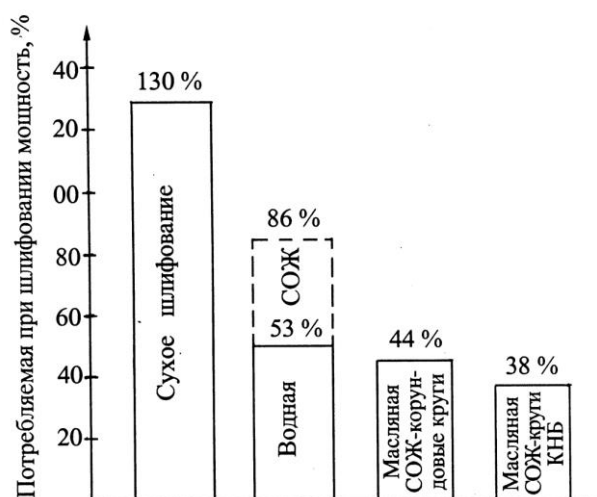


Рис.4. Зависимость потребляемой мощности при шлифовании шлиц с различными СОТС.

С целью определения эффективной СОТС в работе были исследованы различные технологические средства, при этом основные составляющие операции шлифования шлиц: станок, шлифовальный круг, технологическая оснастка, материал заготовки, режимы обработки и припуски оставались неизменными (рис. 4).

Сухое шлифование при подачи воздуха под давлением имеет самую высокую потребляемую мощность (130%). Мощность при применении водных средств снижается и составляет у СОЖ с низким содержанием присадок 86% и с высоким 44%. Применение масляных СОЖ способствовало снижению потребляемой мощности до 44% при шлифовании корундовыми кругами и до 38% при использовании кругов из кубического нитрида бора (КНБ).

Заключение. Проведённые исследования показали, что использование масляных СОЖ в следствии низкой мощности при шлифовании способствует значительному увеличению объёма снимаемого металла в единицу времени. Снижается опасность возникновения прижогов и других термических повреждений. Наиболее важными критериями применения

масляных СОЖ при шлифовании является высокая кинематическая вязкость и низкая степень пено- и туманообразования.

Литература

1. Краткий справочник металлиста. Под общей редакцией А.Е. Древаля и Е.А., Скороходова. М.: Машиностроение, 2005. 910 с.
2. Калашников А.С., Моргунов Ю.А., Калашников П.А. Современные методы обработки зубчатых колёс. Издательский дом «Спектр», Москва, 2012, 238 с.
3. Калашников А.С. Тенденции развития зубообработки. «Ритм». 2016. № 3. С. 14-18.
4. Калашников А.С., Моргунов Ю.А., Калашников П.А. Повышение эффективности изготовления колёс цилиндрических зубчатых передач. «Автомобильная промышленность». 2010. № 11. С. 26-28.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ РАСТУЩЕГО ТОЛСТОСТЕННОГО ЦИЛИНДРА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Нестеров Т.К., Мурашкин Е.В.

ИПМех РАН

E-mail: Nesterovtim4@gmail.com

Предлагается численная процедура на основе метода граничных элементов для моделирования аддитивного изготовления детали, обладающей свойствами осевой симметрии. Процесс наращивания производится ненапряженными элементами на внутренней и внешней поверхности толстостенного упругого цилиндра. Поставленная краевая задача решается в рамках модели непрерывного поверхностного роста, основным отличием которой является то, что задача решается в скоростях исходных величин. Полученные аналитические решения сравниваются с результатами численного моделирования.

В современном мире технологический прогресс не стоит на месте, что приводит к возникновению новых методов производства. Таким примером могут служить аддитивные технологии [1], которые в последнее время становятся все более и более популярными, это связано с принципиальным отличием от современных, устоявшихся методов изготовления деталей. Это позволяет аддитивным способам производства не только дополнять, но и заменять стандартные технологические приемы. Тем не менее, конструктивные характеристики детали зависят не только от материала, из которого изготовлена деталь, но и от процесса изготовления, что обуславливает актуальность математического моделирования таких процессов [2]. К сожалению, не всегда удается получить решения в аналитическом виде. Для численных расчетов подобных задач крайне удобно применять метод граничных элементов (МГЭ) [3, 4]. Главным преимуществом МГЭ и отличием его от метода конечных элементов является отсутствие необходимости пристраивания сетки для внутренних точек растущего тела, а только для точек области роста. Стоит также отметить, что в случае непрерывного наращивания, когда присоединяемые элементы бесконечно малы, применение метода конечных элементов становится нетривиальным. Метод граничных элементов лишен этого недостатка.

В рассматриваемой работе предлагается численная процедура на основе метода граничных элементов для моделирования аддитивного изготовления детали, обладающей свойствами осевой симметрии. Интерес исследователей к задачам со свойствами осевой симметрии не ослабевает до сих пор были получены аналитические решения для различных типов деформируемых материалов упругих [5, 6], упругопластических [7, 8], вязкоупругопластических [9], упругоползучих [10]. Осесимметричные задачи для растущих тел рассматривались в [11, 12]. В настоящей работе предполагаем, что процесс наращивания производится ненапряженными элементами на внутренней и внешней поверхности толстостенного упругого цилиндра. Поставленная краевая задача решается в рамках модели непрерывного поверхностного роста. Полученные аналитические решения сравниваются с результатами численного моделирования.

Рассматривается толстостенный цилиндр с внутренним радиусом R_1 и внешним R_2 , состоящий из изотропного упругого материала. На внутреннюю поверхность цилиндра действует давление $p_1(t)$, на внешнюю – $p_2(t)$. Предполагаем, что массовые силы отсутствуют, а тело было подвергнуто осесимметричной упругомгновенной деформации за счет внутреннего и внешнего давления в момент $t=0$, после чего начался процесс непрерывного осесимметричного наращивания внутренней и внешней границ. Закон изменения внешнего радиуса имеет вид $R_2 = R_2(t)$, а внутреннего – $R_1 = R_1(t)$, $t \in [0, t_e]$, при этом $R_1 \neq 0$ в любой момент времени t . Запишем уравнения, которые будут описывать упругое поведение материала:

$$\sigma_{ij,j} = 0, \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad \sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left(\varepsilon_{i,j} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \varepsilon_{kk} \right). \quad (1)$$

Здесь σ – тензор напряжений, ε – тензор малых деформаций, u – вектор перемещений, E

– модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона. Краевые условия будут иметь вид:

$$\sigma_{rr}(R_1(t)) = p_1(t), \quad \sigma_{rr}(R_2(t)) = p_2(t), \quad (2)$$

Для построения аналитического решения рассматриваемой краевой задачи можно воспользоваться решением задачи Ляме [5, 6] и постановкой краевой задачи в скоростях, в результате распределение параметров напряженно деформированного состояния можно вычислить согласно формулам [12]

$$\dot{u}_r(r,t) = B_1(t)r + \frac{B_2(t)}{r}, \quad \dot{\sigma}_{rr}(r,t) = \frac{E}{1-\nu}B_1(t) - \frac{E}{1+\nu}\frac{B_2(t)}{r^2}, \quad \dot{\sigma}_{\varphi\varphi}(r,t) = \frac{E}{1-\nu}B_1(t) + \frac{E}{1+\nu}\frac{B_2(t)}{r^2},$$

$$B_1(t) = \frac{(1-\nu)[p_1'(t)R_1^2(t) - p_2'(t)R_2^2(t)]}{E[R_2^2(t) - R_1^2(t)]}, \quad B_2(t) = \frac{(\nu+1)[R_1^2(t)R_2^2(t)\{p_1'(t) - p_2'(t)\}]}{E[R_2^2(t) - R_1^2(t)]}.$$

Искомые характеристики напряженно деформированного состояния можно восстановить согласно соотношению

$$f(r,t) = f(r,0)H(r - R_1(0))H(R_2(0) - r) + \int_{\tau(r)}^t \dot{f}(r,s)ds, \quad (3)$$

где $H(R_1(0))$ – функция Хевисайда, $f(r,t) = \{\sigma_{rr}, \sigma_{\varphi\varphi}, u_r\}$, $\tau(R)$ – время присоединения элемента с координатой R .

Рассмотрим процедуру численного моделирования, основанную на методе граничных элементов.

Этап 1. На первом этапе необходимо определить начальные перемещения и напряжения в основном теле в момент времени $\tau = 0$ из формул (1 – 2). Отметим, что МГЭ применяется в декартовой системе координат, поэтому граничные условия (2) примут вид:

$$\bar{x} \in \Gamma_1(0): \bar{P}_1(\bar{x}) = p_1(0)\bar{n}(\bar{x}), \quad \bar{x} \in \Gamma_2(0): \bar{P}_2(\bar{x}) = p_2(0)\bar{n}(\bar{x}), \quad (4)$$

где $\bar{P}_i(\bar{x})$ $i=1,2$ – давление на границе цилиндра, записанное в декартовой системе координат, $\Gamma_1(0) = \{R_1(0)\cos\varphi, R_1(0)\sin\varphi\}$, $\Gamma_2(0) = \{R_2(0)\cos\varphi, R_2(0)\sin\varphi\}$, $\varphi \in [0, 2\pi]$, $\bar{n}_i(\bar{x})$ – нормаль к границе $\Gamma_i(0)$ в декартовой системе координат, \bar{x} – декартовы координаты точки. Численное решение может быть получено с помощью классического метода граничных элементов, описанного в [3, 4]. Таким образом, можно найти начальные перемещения и напряжения в основном теле до момента наращивания и затем необходимо преобразовать их из декартовой в полярную систему координат.

Этап 2. На втором этапе необходимо численно промоделировать эволюцию перемещений и напряжений в процессе роста. Для этого требуется вычислить значения скоростей напряжений и перемещений на всём временном промежутке роста. Если продифференцировать по времени постановку (1) и преобразовать граничные условия (2) в декартову систему координат и, так же, продифференцировать по времени, то можно получить постановку задачи из которой можно будет найти скорости искомых величин. Для численного решения полученной постановки в скоростях можно применить МГЭ. Рассмотрим пошагово процедуру применения МГЭ:

1. создаем сетку по времени $\bar{\tau}_m = [0, \tau_0, \tau_1, \dots, \tau_i, \dots, \tau_e]$ от начала процесса наращивания до остановки процесса роста;
2. для каждого момента времени $\tau_i \in \bar{\tau}_m$ аппроксимируем граничными элементами $\Gamma_1(\tau_i)$ и $\Gamma_2(\tau_i)$;
3. численно решаем уже краевую задачу теории упругости (5) для момента времени τ_i и аппроксимированной границы $\Gamma_1(\tau_i)$ и $\Gamma_2(\tau_i)$, получая значения скоростей исходных перемещений и напряжений в соответствующих узлах временной сетки в декартовой системе координат;
4. преобразуем полученные значения в пункте 3. из декартовой в полярную систему

- координат;
5. находим по формулам (3) с помощью процедуры численного интегрирования перемещения и напряжения в основном и дополнительном телах, используя преобразованные в пункте 4;
 6. скорости исходных величин и начальные напряжения и перемещения, вычисленные на этапе предшествующему этапу наращивания;

Этап 3. На третьем этапе необходимо восстановить перемещения и напряжения после окончания наращивания, для этого достаточно с помощью формул (восст) проинтегрировать до момента окончания наращивания $t = t_e$.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 17-19-01257.

Литература

1. Zohdi T. I. Modeling and Simulation of Functionalized Materials for Additive Manufacturing and 3D Printing: Continuous and Discrete Media: Continuum and Discrete Element Methods. – Springer, 2017. – Т. 60.
2. L. Popov, V. N. Mironenko, V. M. Kozintsev, D. A. Chelyubeev, E. V. Murashkin, A. V. Chentsov, V. V. Vasenev, and S. P. Chervonobrodov Sample-free measurement of linear thermal expansion coefficient of aluminum-matrix composites using speckle-interferometry method // Proceedings of The World Congress on Engineering 2018, 4-6 July, 2018, London, U.K.— 2018. — P. 767–772
3. Бенерджи П., Баттерфилд Р Метод граничных элементов в прикладных науках. – М.: Мир, 1984. – 494 с.
4. Бреббия К.,Теллес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов– М.: Мир, 1987. – 524 с.
5. Southwell R. V. Introduction to the Theory of Elasticity for Engineers and Physicists. – 1941.
6. Лейбензон Л. С. Курс теории упругости. – Гос. изд-во технико-теорет. лит-ры – 1947.
7. Davis E. A., Conelly, F. M., Stress Distribution and plastic Deformation in Cylinder of Strain Hardening Material/ Davis E. A., Conelly F. M.// Journal of Applied Mechanics. 26 (1959). – 2. – pp. 25-30
8. Дац, Е. П., Мурашкин, Е. В., Ткачева, А. В., & Щербатюк, Г. А.. Температурные напряжения в упругопластической трубе в зависимости от выбора условия пластичности.// МТТ –2018. – №1 – С. 32-43.
9. Буренин А. А., Ковтанюк Л. В., Мурашкин Е. В. Об остаточных напряжениях в окрестности цилиндрического дефекта сплошности вязкоупругопластического материала //ПМТФ. – 2006. – Т. 47. – №. 2. – С. 110-119.
10. Бажин А. А., Мурашкин Е. В. О ползучести и релаксации напряжений в окрестности микропоры в условиях гидростатического нагружения и разгрузки //Доклады Академии наук. 2012. – Т. 445. – №. 6. – С. 640-640.
11. Дроздов А.Д. Объемный рост вязкоупругих тел // МТТ. – 1990. – №1. – С.95-101.
12. Stadnik N. E., Murashkin E. V., Dats E. P. Residual stresses computing in blood vessels in virtue of pathological growth processes // Proceedings of The World Congress on Engineering 2018, 4-6 July, 2018, London, U.K. —2018. – P. 618-622.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТНОГО РЕЖИМА ПОДВИЖНЫХ НАГРУЗОК НА ЗОНУ ТЕНИ ЗА СЕЙСМИЧЕСКИМ ПУСТОТЕЛЫМ БАРЬЕРОМ.

Низамаев Т. М.

Научный руководитель – профессор, д.ф.-м.н. Кузнецов С.В.
МГСУ, Институт фундаментального образования, Кафедра сопротивления материалов
E-mail: zaqwsx27@mail.ru

Построена численная модель для анализа распространения волнового поля, которое образуется от нагрузок, которые движутся в одном направлении с одинаковой скоростью и с заданным расстоянием между ними.

В первой части работы рассматривается распространение волнового поля при четырех типах скоростях нагрузок:

- Дозвуковая скорость $v < C_R$ (0,617)
- Первый сверхзвуковой диапазон $C_R(0,617) < v < C_S(0,71)$
- Второй сверхзвуковой диапазон $C_S(0,71) < v < C_P(1)$
- Третий сверхзвуковой диапазон (transonic velocity) $C_P(1) < v$.

C_R – скорость волн Рэлея

C_S – скорость поперечных волн

C_P – скорость продольных волн

v – скорость движения подвижных нагрузок

Проводится анализ длины распространения колебаний от оси движения нагрузок и максимальные магнитуды колебаний при различных типах скоростей.

В качестве расчетной модели в программном комплексе Abaqus берется ограниченная поверхность геометрические размеры которой удовлетворяют условию, что распространение волнового поля не дойдет до границ поверхности в период рассмотрения процесса.

Для анализа были смоделированы две подвижные нагрузки, скорость движения которых одинаковая и расстояние между ними фиксировано (рис.1)

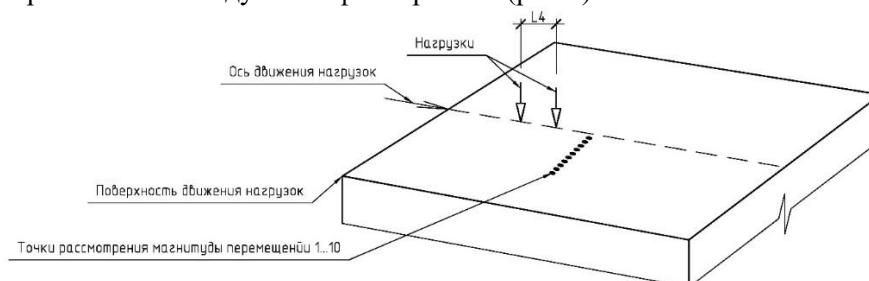


Рис.1 Схема расположения нагрузок

Во второй части работы в расчетную 3D модель добавляется траншейный барьер вдоль всей оси движения нагрузок. Известно, что при данной постановке задачи за барьером образуется зона тени, в которой колебаний волнового поля минимальны.

Для анализа будет взята пустотелая траншея с глубиной (H) 3 метра и шириной (L2) 1 метр. Схема расположения нагрузки по отношению к траншее показана на рис. 3

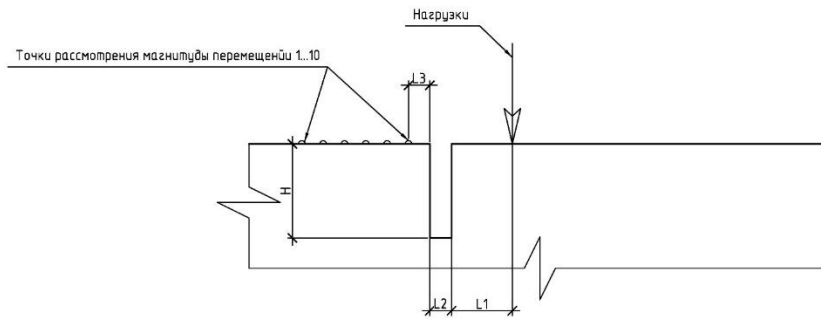


Рис.3 Схема расположения нагрузок относительно пустотелого барьера.

Поставлена задача проследить зависимость изменения размеров данной зоны в зависимости от типов скорости движения нагрузок.

Зона тени находится путем отношения магнитуды перемещений точки, возбуждаемые волновым полем, при условии наличия барьера к магнитуде перемещений точки без барьера. Данное отношение является коэффициентом редукиции:

$$K_{red} = \frac{U_B}{U_0}$$

Где

U_B - перемещение при наличии барьера ; U_0 - перемещение без барьера;

K_{red} - коэффициент редукиции

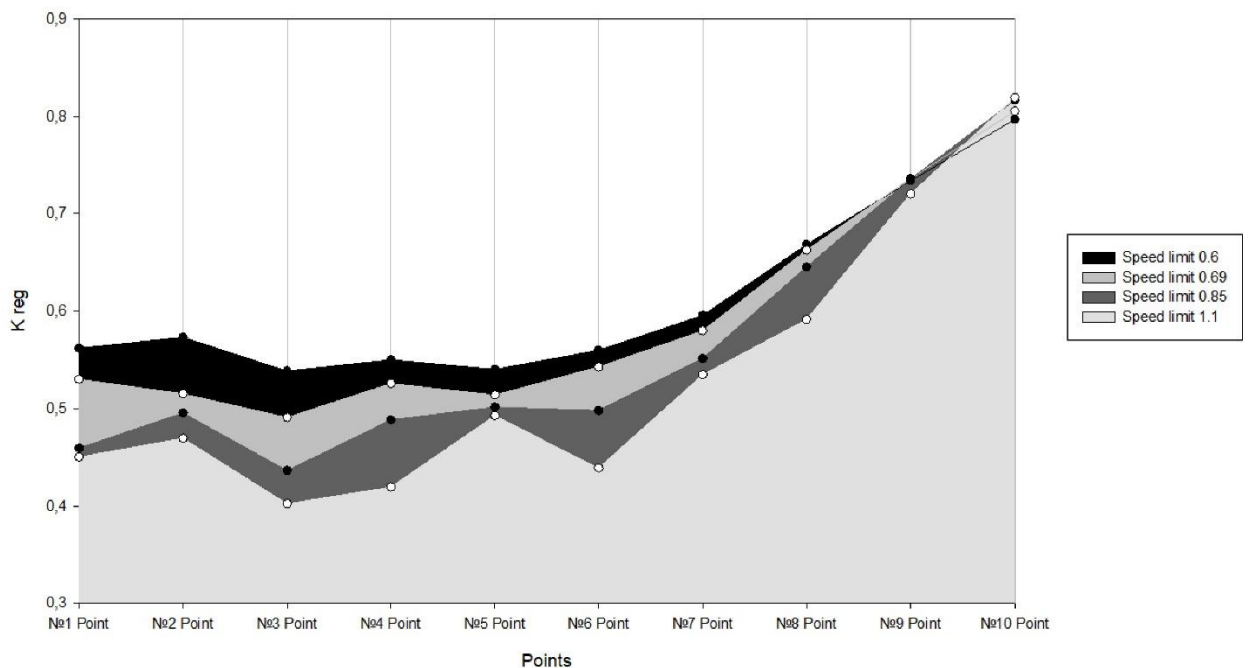


Рис.3 График зоны тени за барьером (H=3м, L2=1м)

На рис. 3 изображен график изменения зоны тени за пределами пустотелого барьера при различных скоростных режимах движения нагрузок. Наблюдается характерное уменьшения магнитуды колебаний точек с 1 по 8 при увеличении скорости движения нагрузок. Данный эффект объясняется тем, что при увеличении скорости движения увеличивается скорость распространения волнового поля, но при «ударе» с пустотелым барьером процент его рассеивания от барьера тоже увеличивается, следственно увеличивается зона тени.

Постановка задачи основана на работах посвященных влиянию пустотелого траншейного барьера на распространение волнового поля за его границей с помощью конечноэлементных плоских моделей [1,2], а также на работах [3,4], в которых рассматривались барьеры конечной глубины с возникающей зоной тени за их границами.

Исходя из полученных результатов и рассмотрев таблицу сравнения коэффициентов редукции, можно сделать следующие выводы:

- При наличии пустотелого сейсмического барьера зона тени позволяет проанализировать область, в которой магнитуда перемещений поверхности достигает минимума и уменьшается почти в два раза
- При увеличении скорости движения нагрузок наблюдается постепенное снижения коэффициента редукции и магнитуды колебаний точек.
- В некоторых точках (к примеру №6) коэффициент редукции не сильно уменьшается, как в остальных точках. Именно с первой подобной точки начинает рассеиваться зона тени.

Литература

1. Itoh K., Zeng X., Koda M., Murata O., and Kusakabe O. Centrifuge Simulation of wave Propagation due to Vertical Vibration on Shallow Foundations and Vibration Attenuation Countermeasures // Journal of Vibration and Control, 2005, No. 11, pp. 781-800.
2. Yang, Y.B., Hung, H.H., and Chang, D.W. Train-Induced Wave Propagation in Layered Soils Using Finite/Infinite Element Simulation // Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, vol. 23, pp. 263-278
3. Bornitz G. Uber die Ausbreitung der von Grozklolbenmaschinen erzeugten Bodenschwingungen in die Tiefeo Springer-Verlag, Berlin, 1931.
4. Barkan D.D. Dynamics of Bases and Foundations, McGraw-Hill, New York, 1962. 434p. (Russian edition, 1948).

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГЦК ПОЛИКРИСТАЛЛОВ С УЧЕТОМ ЭВОЛЮЦИИ ДИСЛОКАЦИОННЫХ СКОПЛЕНИЙ

Никифоров А.С.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
E-mail: aleksandr.niciforov@gmail.com

В работе рассматривается процесс неупругого деформирования металлов с гранцентрированной кубической (ГЦК) решёткой с учетом эволюции физико-механических характеристик материала. Приведены основные соотношения двухуровневой упруговязкопластической модели неупругого деформирования представительного объема (ПО) поликристалла, введены понятия упрочнения, микроповрежденности и супердислокации. Предложено разделение скалярной плотности дислокаций на плотность статистически запасенных дислокаций (СЗД) и геометрически необходимых дислокаций (ГНД). Получены зависимости интенсивности напряжений от интенсивности деформаций с учетом упрочнения, а также получены зависимости эволюции плотности ГНД и СЗД в процессе деформирования.

В настоящее время при создании металлических изделий или конструкций особое внимание необходимо уделять изменению физико-механических характеристик материала, в первую очередь – его прочностные и пластические свойства. Прочностные характеристики материала в первую очередь определяются эволюцией дефектной структуры на различных масштабных уровнях. В процессе деформирования материала при увеличении прикладываемых напряжений и накопленной деформации изменяются свойства материала. Даже на стадии упругого деформирования в микроструктуре материала возникают некоторые носители поврежденности – микротрещины и микропоры [1–2]. Микроповрежденность, незначительная в начале деформирования, развивается, накапливается в ходе эволюции дефектной структуры и в некоторый момент деформирования приводит к разрушению материала или образца.

Таким образом, целью работы является разработка и численная реализация математической модели неупругого деформирования представительного объема ГЦК поликристалла с учетом эволюции дислокационных скоплений как механизма генерации микротрещин. Под дислокационным скоплением в рамках работы понимаются поджатые к барьеру какого-либо рода дислокации, далее будем их называть геометрически необходимыми (ГНД), а остальные (равномерно распределенные по объему) дислокации – статистически запасенными дислокациями (СЗД) (см. рис.1). Следует отметить, что геометрически ГНД представляют собой дополнительные экстраплоскости, необходимые для реализации предписанных искажений (кривизн и кручений) кристаллической решетки.

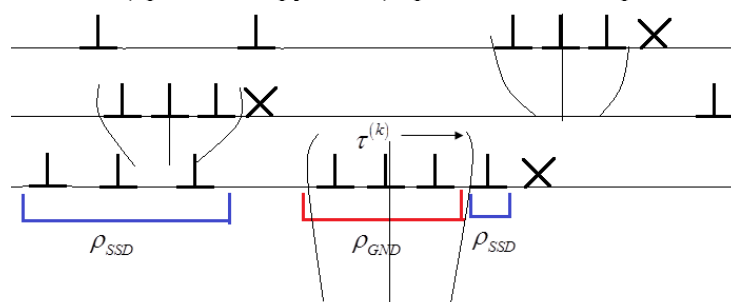


Рис.1. Разделение дислокаций на ГНД и СЗД

Под разрушением в данной работе понимается потеря способности материала сопротивляться предписанным деформациям, происходящая в результате возникновения и эволюции дефектов специального типа – микротрещин и микропор [3]. В качестве примера зародышевой микротрещины является образование так называемой «супердислокации». Супердислокацию можно представить в виде «большой дислокации», образованной объединением дислокаций в головной части скопления из ГНД (рис.2). Так же стоит отметить, что если в такую дислокационную микротрещину войдут дислокации обратного знака, то произойдет ее затупление и она превратится в пору.

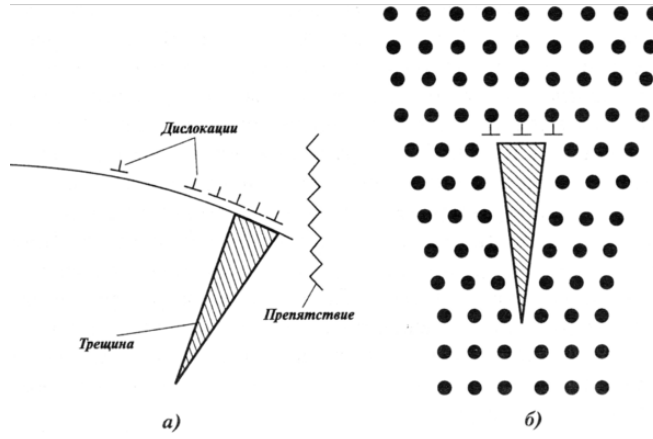


Рис.2. Скопление дислокаций у препятствий (а), слияние дислокаций и образование зародышевой трещины (б) [4]

Для достижения поставленной цели в работе используется двухуровневая упруговязкопластическая модель неупругого деформирования ГЦК поликристалла. Считается, что основной вклад в неупругое деформирование вносит движение дислокаций по кристаллографическим системам скольжения (СС) и остановка геометрически необходимых дислокаций вблизи прочных барьеров какого-либо рода (дислокационных барьеров типа Ломера-Коттрелла и Хирта, границы зерен, двойников, включений жесткой фазы и т.д.). Математическая постановка задачи на макроуровне (уровне ПО) описывается следующей системой уравнений [5]:

$$\begin{cases} \dot{\Sigma} = \Pi : (\mathbf{Z} - \mathbf{Z}^{in}), \\ \mathbf{Z} = \hat{\nabla} \mathbf{V}^T, \\ \Pi = \langle \mathbf{n}_{(i)} \rangle, \\ \mathbf{Z}^{in} = \langle \zeta_{(i)}^{in} \rangle, \\ \text{где } i = 1, \dots, N, \end{cases} \quad (1)$$

где $\langle \cdot \rangle$ – осреднение по представительному объему поликристалла, Σ – тензор напряжений Коши, Π – тензор модулей упругости, \mathbf{Z} , \mathbf{Z}^{in} – мера скорости деформации на макроуровне, ее упругая и неупругая составляющая, \mathbf{o} – тензор ориентации кристаллической решетки кристаллита, $\mathbf{n}_{(i)}$, $\zeta_{(i)}^{in}$ – тензоры модулей упругости напряжений, неупругой составляющей меры скорости деформации i -го кристаллита. Величины \mathbf{Z}^{in} , Π определяются путем осреднения по всем элементам низшего масштабного уровня.

Состояние элемента мезоуровня (кристаллита) характеризуется текущими критическими напряжениями сдвига по всем СС, упругими параметрами, параметрами упруговязкопластического закона. Для связи масштабных уровней используется расширенная кинематическая гипотеза Фойгта: $\zeta = \mathbf{Z}$.

Эволюционное уравнение для скорости сдвига дислокаций по системе скольжения с номером k принимает следующий вид [6]:

$$\dot{\gamma}^{(k)} = \dot{\gamma}_0 \left(\frac{\tau_{eff}^{(k)}}{\tau_c^{(k)}} \right)^{1/m} \exp \left[-\frac{G_0}{kT} \left(1 - \frac{\tau_{eff}^{(k)}}{\tau_c^{(k)}} \right) \right] \text{H} \left(\tau_{eff}^{(k)} - \tau_c^{(k)} \right), \quad (2)$$

где эффективные касательные напряжения на СС определяются:

$$\tau_{eff}^{(k)} = \tau^{(k)} - \tau_{bs}^{(k)}, \quad (3)$$

где $\tau_{bs}^{(k)}$ – обратные напряжения, которые действуют на дислокации в скоплении со стороны барьера и других дислокаций скопления и которые препятствуют сдвигу в направлении «к барьеру». Таким образом, обратные напряжения определяются как:

$$\tau_{bs}^{(k)} = \sigma^{int} : \mathbf{n}^{(k)} \mathbf{b}^{(k)}, \quad (4)$$

где $\mathbf{n}^{(k)} \mathbf{b}^{(k)}$ – ориентационный тензор соответствующей СС, σ^{int} – поле внутренних напряжений.

Изменение критических касательных напряжений на k -ой СС может быть представлено в следующем виде [6]:

$$\tau_c^{(k)} = cGb \sqrt{\sum_{j=1}^{12} A^{(k)(j)} |\rho_{SSD}^{(j)}| + \sum_{j=1}^{12} A^{(k)(j)} |\rho_{GND}^{(j)}|}, \quad (5)$$

где c – константа материала, G – модуль сдвига, b – величина вектора Бюргерса, $A^{(k)(j)}$ – компоненты матрицы упрочнения, $\rho_{GND}^{(k)}$ – плотность ГНД, $\rho_{SSD}^{(k)}$ – плотность СЗД.

Плотность статистически запасенных дислокаций изменяется по закону:

$$\dot{\rho}_{SSD}^{(k)} = \frac{1}{b} \left(\frac{1}{L^{(k)}} - 2y_c \rho_{SSD}^{(k)} \right) \left| \dot{\gamma}^{(k)} \right|, \quad (6)$$

где b – величина вектора Бюргерса, $L^{(k)}$ – длина свободного пробега дислокации, y_c – константа материала, $\dot{\gamma}^{(k)}$ – скорость сдвига дислокаций на СС.

Длина свободного пробега дислокаций находится с помощью соотношения:

$$L^{(k)} = \frac{K}{\sqrt{\sum_{j=1}^{12} A^{(k)(j)} |\rho_{SSD}^{(j)}| + \sum_{j=1}^{12} A^{(k)(j)} |\rho_{GND}^{(j)}|}}. \quad (7)$$

Описанная выше модель реализована численно. С ее помощью были получены кривые НДС моно- и поликристалла, а также получены зависимости эволюции плотностей геометрически необходимых и статистически запасенных дислокаций. В работе выявлено, что чем больше СС активируется в процессе деформирования, тем интенсивнее эволюционируют плотности ГНД и СЗД. Также стоит отметить, что в процессе деформирования рост СЗД замедляется, а плотность ГНД эволюционирует; это связано с тем, что в процессе деформирования образуются дислокационные скопления и подвижные дислокации СЗД становятся ГНД.

Литература

1. Богачев И.Н., Вайнштейн А.А., Волков С.Д. Статистическое металловедение. – М.: Металлургия, 1984. – 176 с.
2. Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика неупругого деформирования и разрушения композитных материалов. – М.: Наука. Физматлит, 1997. – 288с.
3. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. – М.: Наука. 1974. – 312с.
4. Хеллан К. Введение в механику разрушения. – М.: Мир, 1988. -364 с.
5. Трусов П.В. Физические теории пластичности: учеб. пособие / П.В. Трусов, П.С. Вологов, Н.С. Кондратьев. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013. – 244 с.
6. Bayley C.J., Brekelmans W.A.M., Geers M.G.D. A comparison of dislocation induced back stress formulations in strain gradient crystal plasticity. // International Journal of Solids and Structures. –2006. – Vol. 43. – Pp. 7268–7286.

РЕНТГЕНСПЕКТРАЛЬНЫЙ МИКРОАНАЛИЗ ЧАСТИЦ ПОРОШКА, ПОЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫМ ДИСПЕРГИРОВАНИЕМ ОТХОДОВ АЛЮМИНИЯ В ДИСТИЛЛИРОВАННОЙ ВОДЕ

Новиков Е.П., Агеев Е.В.

Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

Рассмотрен метод электроэрозионного диспергирования, установлено, что частицы порошка полученного методом электроэрозионного диспергирования отходов алюминия в дистиллированной воде, имеют в своем составе следующие элементы: Al, O.

Благодаря лёгкости, достаточной прочности, способности сплавляться со многими другими металлами и хорошей электропроводности алюминий находит широкое применение в электротехнике, а также как конструкционный материал в машиностроении, авиастроении, строительстве и др. Чистый и сверхчистый алюминий применяют в полупроводниковой технике и для покрытия разного рода зеркал. Алюминий получил применение в ядерных реакторах в связи с относительно низким сечением поглощения нейтронов. В ёмкостях и таре из алюминия транспортируют жидкие газы (метан, кислород, водород), некоторые кислоты (азотную, уксусную), хранят пищевые продукты, воду, масла. Как легирующую добавку алюминий используют в сплавах Cu, Mg, Ti, Ni, Zn, Fe. В ряде случаев алюминий идёт на изготовление взрывчатых веществ (алюминат, алюмотол и др.).

Анализ способов получения алюминиевых порошков показал, что они обладают значительными недостатками, а именно:

- ограниченная применимость. Способ применяется только к отдельным видам алюминиевых заготовок (проволока, стружка, порошок);
- высокая энергоёмкость плавления – распылительного передела;
- невозможность управления характеристиками получаемых ПМ.

Одним из перспективных методов получения порошка, практически из любого токопроводящего материала, в том числе и отходов алюминия, является метод электроэрозионного диспергирования (ЭЭД), отличающийся относительно невысокими энергетическими затратами и экологической чистотой процесса [1-6].

Целью настоящей работы являлось проведение рентгеноспектрального микроанализа частиц порошка, полученного электроэрозионным диспергированием отходов алюминия в дистиллированной воде.

Для получения алюминиевого порошка методом электроэрозионного диспергирования использовали алюминиевую проволоку чистотой 99,9 %, предварительно нарезанную по 5-7 см. Проволоку загружали в реактор, заполненный рабочей жидкостью – дистиллированной водой. Процесс проводили при следующих электрических параметрах: ёмкость разрядных конденсаторов 65 мкФ; напряжение 110 В; частота импульсов 150 Гц. В результате локального воздействия кратковременных электрических разрядов между электродами произошло разрушение материала с образованием дисперсных частиц порошка.

После выпаривания остатков рабочей жидкости проводили рентгеноспектральный анализ, полученных алюминиевых частиц.

Рентгеноспектральный анализ частиц алюминиевых электроэрозионных порошков выполнен с помощью энергодисперсионного анализатора рентгеновского излучения фирмы EDAX, встроенного в растровый электронный микроскоп QUANTA 600 FEG. Под рентгеноспектральным микроанализом понимают определение элементного состава микрообъектов по возбуждаемому в них характеристическому рентгеновскому излучению. Для анализа характеристического спектра в рентгеноспектральном микроанализе используют два типа спектрометров (бескристалльный либо с кристаллом-анализатором), базой для РСМА служит электронно-оптическая система растрового электронного микроскопа. Результаты рентгеноспектрального микроанализа частиц алюминиевого ПМ (полученного при следующих параметрах: ёмкость разрядных конденсаторов 65 мкФ; напряжение 110 В; частота импульсов 150 Гц), проведенного с помощью энергодисперсионного анализатора рентгеновского излучения фирмы EDAX, встроенного в

растровый электронный микроскоп QUANTA 600 FEG, представлены на рисунке 1 и в таблице 1.

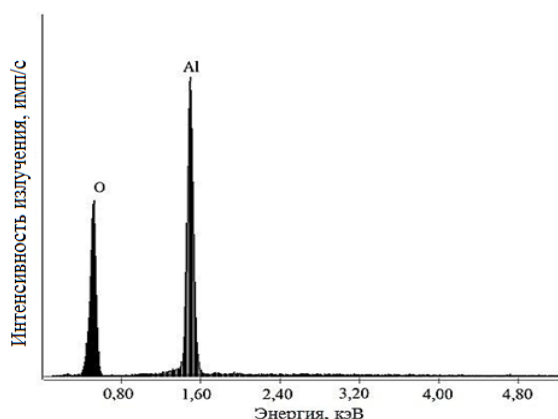


Рис.1 – Элементный состав алюминиевого порошка, полученного электроэрозионным диспергированием в дистиллированной воде

Таблица 1 – Элементный состав алюминиевого порошка

| Элемент | Массовая доля, % | Атомарная доля, % |
|---------|------------------|-------------------|
| О | 49,32 | 58,24 |
| Al | 50,68 | 41,76 |
| Итого | 100.00 | 100.00 |

По результатам представленных данных установлено, что основными элементами алюминиевого порошка, полученного методом электроэрозионного диспергирования отходов алюминия в дистиллированной воде, являются кислород и алюминий.

Таким образом, рентгеноспектральный микроанализ позволил определить элементный состав микрообъектов частиц алюминиевых порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов алюминия по возбуждаемому в них характеристическому рентгеновскому излучению.

Литература

1. Пат. 2449859, Российская Федерация, С2, В22F9/14. Установка для получения нанодисперсных порошков из токопроводящих материалов / Агеев Е.В.; заявитель и патентообладатель Юго-Западный государственный университет. – № 2010104316/02; заяв. 08.02.2010; опубл. 10.05.2012. – 4 с.
2. Переверзев А.С. Проведение рентгеноспектрального микроанализа порошка свинцовой бронзы, полученного электроэрозионным диспергированием в дистиллированной воде / Е.В. Агеев, А.С. Переверзев // Прогрессивные материалы и технологии изготовления заготовок: Материалы Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых. – Рыбинск: РГАТУ имени П. А. Соловьева, 2018. – С.31-34.
3. Переверзев, А.С. Исследование влияния электрических параметров установки на производительность процесса электроэрозионного диспергирования отходов свинцовой бронзы в дистиллированной воде / Е.В. Агеева, А.С. Осьминина, А.С. Переверзев // Известия ЮЗГУ. –2018. – №1 – С. 6-14.
4. Агеева Е.В. Характеристики электроискровых покрытий, полученных электродами из электроэрозионных порошков быстрорежущей стали / Е.В. Агеева, Р.А. Латыпов, Е.В. Агеев, В.Ю. Карпенко, А.Ю. Алтухов // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2015. – №.2 – С. 62–66.
5. Агеев, Е.В. Исследование свойств электроэрозионных порошков и твердого сплава, полученного из них изостатическим прессованием и спеканием / Е.В. Агеев, Р.А. Латыпов, Е.В. Агеева // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2014. – № 6. – С. 51-56.
6. Латыпов Р.А. Изучение технологических свойств алюминиевого порошка, полученного электроэрозионным диспергированием в воде / Р.А. Латыпов, В.И. Сайтов, Е.В. Агеев, Е.П. Новиков // Международный технико-экономический журнал. 2017. № 6. С. 65-71.

ТЕРМОРАСШИРЕННЫЙ ГРАФИТ КАК МАТЕРИАЛ ВТОРОГО ПОРЯДКА

Окатыев Р.С., Зубко И.Ю.

ПНИПУ

E-mail: okatjevrs@gmail.com

Рассматривается задача о моделировании процесса эксплуатации уплотнительного кольца из терморасширенного графита. Задача решается в градиентной и классической постановках. Оценивается влияние градиентных модулей упругости и масштабного параметра на распределение полей напряжений и деформаций в кольце.

Введение. Терморасширенный графит (ТРГ) – это уникальный материал, который обладает высокой термической и химической стойкостью, низким коэффициентом трения, высокими упругими свойствами. Уплотнительные элементы из терморасширенного графита находят применение в различных областях техники и промышленности, так как они пригодны для эксплуатации в различных агрессивных жидких и газовых средах. В связи с этим актуальной является задача описания механического поведения изделий из терморасширенного графита. Уплотнительные кольца из терморасширенного графита создаются путем намотки графитовой фольги. Реально используемые образцы могут быть самых разных размеров, причем, в силу технологических трудностей, кольца большого диаметра обычно делаются составными.

В работе рассматривается задача о нагружении сплошного цилиндрического кольца. На внешней и внутренней поверхностях кольца задается условие трения с малым коэффициентом (коэффициент трения терморасширенного графита по стали – 0,8-0,12). На нижней поверхности кольца заданы нулевые осевые перемещения, на верхней – рабочее давление. Задача решается в двух постановках – классической и градиентной. Необходимость использования градиентной постановки обусловлена наличием у рассматриваемого изделия микроструктуры, которая может давать существенный вклад в решение задачи.

Методы. При решении задачи в классической постановке принимается гипотеза о том, что изделие обладает цилиндрической анизотропией – трансверсальной изотропией с осью анизотропии, направленной по радиусу в цилиндрической системе координат. Физически это соответствует изотропии в слоях графитовой фольги. Для записи закона Гука для данного типа анизотропии используется разложение Рыхлевского [1]. В итоге закон Гука с учетом осевой симметрии задачи представляется в виде

$$\begin{aligned}\sigma_{rr} &= k_1 \varepsilon_{rr} + k_2 \varepsilon_{\varphi\varphi} + k_3 \varepsilon_{zz}, \\ \sigma_{\varphi\varphi} &= k_2 \varepsilon_{rr} + k_3 \varepsilon_{\varphi\varphi} + k_4 \varepsilon_{zz}, \\ \sigma_{zz} &= k_2 \varepsilon_{rr} + k_4 \varepsilon_{\varphi\varphi} + k_3 \varepsilon_{zz}, \\ \sigma_{rz} &= \lambda_1 \varepsilon_{rz}, \\ \sigma_{r\varphi} &= \sigma_{\varphi z} = 0.\end{aligned}\quad (1)$$

Здесь $k_1 = \lambda_3 \sin^2 \phi + \lambda_4 \cos^2 \phi$, $k_2 = \frac{\sin 2\phi}{2\sqrt{2}}(\lambda_4 - \lambda_3)$, $k_3 = \frac{\lambda_3 \cos^2 \phi + \lambda_4 \sin^2 \phi}{2} + \lambda_2$,

$k_4 = \frac{\lambda_3 \cos^2 \phi + \lambda_4 \sin^2 \phi}{2} - \lambda_2$; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ – упругие модули из разложения Рыхлевского,

ϕ – параметр дистрибутора жесткости; ε_{ij} – компоненты тензора малых деформаций.

В рамках градиентной постановки используется модель изотропной градиентной среды второго порядка, предложенная в работах [2, 3]. Упругий потенциал представляется в виде

$$U = \frac{1}{2} \boldsymbol{\varepsilon} : \mathbf{C}^4 : \boldsymbol{\varepsilon} + \frac{1}{2} \mathbf{u} \nabla \nabla \cdot : \mathbf{C}^6 : \cdot \mathbf{u} \nabla \nabla, \quad (2)$$

где $\boldsymbol{\varepsilon} = (\nabla \mathbf{u} + \mathbf{u} \nabla) / 2$ – тензор малых деформаций, \mathbf{u} – вектор перемещений, ∇ – набла-оператор, \mathbf{C}^4 и \mathbf{C}^6 – тензоры упругих модулей 4-го и 6-го порядков. В изотропном случае \mathbf{C}^4 содержит 2 упругих модуля (параметры Ламе), \mathbf{C}^6 – 5 градиентных упругих модулей.

Уравнение равновесия при отсутствии массовых сил записывается в виде

$$\nabla \cdot (\boldsymbol{\sigma} - \nabla \cdot \mathbf{s}) = \mathbf{0}. \quad (3)$$

Здесь $\boldsymbol{\sigma} = \partial U / \partial \boldsymbol{\varepsilon}$ – тензор напряжений Коши, $\mathbf{s} = \partial U / \partial \mathbf{u} \nabla \nabla$ – тензор гипернатяжений. Записывая уравнение относительно перемещений, получим

$$\nabla \nabla \cdot [(\lambda + \mu) \mathbf{u} - C_1 \Delta \mathbf{u}] + \Delta [\mu \mathbf{u} - C_2 \Delta \mathbf{u}] = \mathbf{0}, \quad (4)$$

где λ, μ – параметры Ламе; C_1, C_2 – комбинации градиентных упругих модулей. Из соображений размерности уравнение (4) можно представить в виде

$$\nabla \nabla \cdot [(\lambda + \mu) \mathbf{u} - l^2 \alpha \Delta \mathbf{u}] + \Delta [\mu \mathbf{u} - l^2 \beta \Delta \mathbf{u}] = \mathbf{0}, \quad (5)$$

где l – масштабный параметр, характеризующий масштаб неоднородности рассматриваемой среды. Применительно к задаче об уплотнительных кольцах, за l можно принять расстояние между слоями фольги. Таким образом можно учесть влияние характеристик микроструктуры рассматриваемого образца.

В силу того, что силы трения действуют в некоторой локализованной области вблизи контакта, предполагается, что градиентная постановка поможет описать расслоение кольца вблизи штока, наблюдаемое на практике.

Литература

1. J. Rychlewski. A qualitative approach to Hooke's tensors. Part I // Archives of Mechanics, 2000. – V. 52. – N. 4-5. – Pp. 737-759.
2. R. D. Mindlin. Second gradient of strain and surface-tension in linear elasticity // Int. J. Solids Structures, 1965. – N1. – Pp. 417-438.
3. R. A. Toupin. Theories of Elasticity with Couple-stress // Archive of Rational Mechanics and Analysis, 1964. – N2. – Pp. 85-112.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОСЛОЙНО ИЗГОТАВЛИВАЕМОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КОМПОЗИТНОМ СЛОЕ, АРМИРУЕМОМ НАТЯНУТОЙ НИТЬЮ В ОКРУЖНОМ НАПРАВЛЕНИИ

Паршин Д.А.

ИПМех РАН

E-mail: parshin@ipmnet.ru

С помощью современных подходов механики непрерывно наращиваемых деформируемых твердых тел разработана неклассическая математическая модель процесса аддитивного изготовления цилиндрических композитных изделий путем многослойной навивки на вращающуюся основу погружаемой в затвердевающее связующее предварительно натягиваемой армирующей нити. Построенные замкнутые аналитические зависимости позволяют проследить процесс формирования и развития полей технологических напряжений в получаемом изделии при различных законах изменения параметров моделируемого технологического процесса и выработать рекомендации по эффективному управлению распределениями этих напряжений.

Проблематика исследования. Технологические напряжения появляются при различных методах изготовления изделий. Зачастую эти напряжения становятся причиной неправильного формирования изделия или вообще его разрушения (причем, возможно, уже в процессе изготовления), либо же значительно ухудшают эксплуатационные характеристики готового изделия. В таких ситуациях технологические напряжения рассматриваются как негативный фактор. Между тем, если оказывается возможным каким-то образом добиться таких распределений технологических напряжений, которые будут хотя бы в некоторой степени компенсировать напряжения от воздействий на изделие, возникающих в процессе его дальнейшей эксплуатации, то именно формирование этих распределений может стать одной из основных задач, на решение которых будут направлены мероприятия, осуществляемые в процессе изготовления данного изделия. Успешное решение этой задачи приведет к увеличению прочности, жесткости, устойчивости, несущей способности или долговечности готового изделия, либо позволит в каком-то смысле оптимизировать его функции.

Неоспоримым преимуществом композитных изделий является то, что при их изготовлении открывается множество возможностей для целенаправленного формирования контролируемых или даже заранее предписанных распределений технологических напряжений — как сопровождающих сам процесс изготовления, так и приобретаемых изделием по окончании этого процесса. Ясно, однако, что для обеспечения таких распределений требуется не только детально понимать механизм формирования технологических напряжений в конкретном процессе изготовления изделия, но и располагать адекватным количественным описанием этого механизма. Последнее может быть достигнуто только путем математического моделирования рассматриваемого технологического процесса с позиций механики.

Применяемый подход. Значительную долю используемых методов изготовления материалов, элементов конструкций и деталей машин составляют разнообразные аддитивные технологии — в широком понимании этого термина. При использовании таких технологий изготавливаемые изделия представляют собой тела, которые изменяют свои размеры и форму за счет последовательного присоединения к их граничной поверхности дополнительных слоев нового материала. Такой аддитивный процесс в механике деформируемого твердого тела называют наращиванием, или ростом тела. Коль скоро в рассматриваемом технологическом процессе изготавливаемое твердое тело и присоединяемый к нему материал подвергаются воздействию тех или иных деформирующих факторов (механических нагрузок, физических полей), данное тело будет вовлечено в процесс деформирования, причем этот процесс будет протекать одновременно с процессом пополнения тела новыми материальными элементами. Именно последнее обстоятельство принципиально отличает деформационные процессы, протекающие в наращиваемых телах, от процессов деформирования классических для механики твердых тел постоянного состава.

Подходы, традиционно используемые при постановке проблем механики, связанных с

исследованием процессов аддитивного производства изделий, представляют собой, как правило, попытки применения к формируемым в этих процессах деформируемым твердым телам, являющимся по существу наращиваемыми телами, стандартных воззрений континуальной механики, дополняемых введением различных поправок в классические соотношения. При этом ряд принципиальных факторов, характеризующих саму механическую специфику моделируемых процессов наращивания, не принимается во внимание должным образом. На основе такого рода подходов весьма проблематично более или менее адекватно описать причины, по которым аддитивно изготавливаемые изделия приобретают те или иные свои механические свойства, и то, каким образом на эти свойства возможно повлиять, изменяя в моделируемом процессе изготовления изделия определенные параметры этого процесса.

Настоящее исследование опирается на новейшие разработки в механике растущих деформируемых твердых тел. Основные результаты в этой области за последние два десятилетия получены в рамках отечественной научной школы, созданной известным ученым механиком и математиком, профессором А.В. Манжировым. Построенная теория позволяет с единых позиций адекватно описывать разнообразные процессы аддитивного формирования твердых тел с учетом специфики деформационных процессов, протекающих вблизи границы их роста при ее вступлении во взаимодействие со вновь присоединяемым материалом, а также с учетом специфической внутренней геометрии растущего тела, порождаемой конкретной реализуемой программой его наращивания. Такой подход подтвердил свою корректность и эффективность во множестве выполненных теоретических и прикладных изысканий (см., например, [1–16]) и по целому ряду ключевых позиций опережает разнообразные другие подходы, практикуемые как в нашей стране, так и за рубежом.

Исследуемая задача. В настоящей работе моделируются технологические процессы изготовления композитов путем многослойной силовой навивки на вращающуюся круговую цилиндрическую основу погружаемой в затвердевающее связующее тонкой армирующей нити. Процесс изготовления состоит из последовательного формирования монослоев — слоев получаемого композитного материала в один виток армирующей нити в радиальном направлении. Толщина каждого такого монослоя считается малой по сравнению с внутренним радиусом и общей толщиной всего формируемого слоя материала, а также его длиной в осевом направлении. Рассматривается такой вариант навивки нити, когда каждый отдельный ее виток укладывается в поперечной плоскости, иными словами, ориентируется под прямым углом к образующей цилиндра. Расположение витков по длине получаемого изделия в очередном формируемом монослое никак не согласуется с расположением витков в предыдущем монослое. Радиальное положение нити внутри связующего одного монослоя также является случайным и может быть различным для различных витков этого монослоя. Таким образом, в любом осевом продольном сечении всего сформированного к текущему моменту времени слоя материала армирующие нити распределяются в достаточной степени хаотично, так что получающееся в итоге композитное изделие приобретает трансверсально изотропные свойства относительно окружного направления. Последний факт подтверждается результатами экспериментов с намоточными волокнистыми стеклопластиками, описанных в [17].

Исследуется проблема формирования и развития упругих технологических напряжений в получаемом описанным образом композитном изделии, возникающих в результате действия на навиваемую нить некоторой, в общем случае произвольно меняющейся в процессе навивки, силы ее предварительного натяжения. Изучается случай квазистатического деформирования формируемого композитного слоя в условиях плоской деформации.

Полученные результаты. В настоящей работе построена неклассическая математическая модель исследуемого технологического процесса аддитивного формирования композитного изделия. Упростить построение этой модели позволяет упомянутая выше относительная малость толщины монослоев, благодаря которой дискретный в реальности процесс добавления к наращиваемому цилиндрическому телу элементарных слоев дополнительного материала может моделироваться как непрерывный процесс роста этого тела в радиальном направлении за счет присоединения к его наружной цилиндрической поверхности

бесконечно тонких дополнительных материальных слоев за бесконечно малые промежутки времени.

С помощью предложенной модели построены замкнутые аналитические зависимости, позволяющие проследить эволюцию технологических напряжений в рассматриваемом изделии на протяжении всего процесса его изготовления при различных реализуемых законах изменения всех параметров этого процесса. Качественные и количественные результаты, полученные в работе, позволяют по-новому взглянуть на некоторые механические аспекты производства композитов и обнаружить не известные ранее эффекты, связанные с развитием во время изготовления их напряженно-деформированного состояния, а также указать возможные способы управления этим состоянием.

Работа выполнена по теме госзадания № АААА-А17-117021310381-8 и частично в рамках проекта РФФИ № 17-51-45054-ИНД_а.

Литература

1. Манжиров А.В. О кручении растущего цилиндра жестким штампом // ПММ. 1990. Т. 54. Вып. 5. С. 842–850.
2. Манжиров А.В., Черныш В.А. Задача об усилении заглубленной арочной конструкции методом наращивания // Изв. РАН. МТТ. 1992. № 5. С. 25–37.
3. Манжиров А.В., Михин М.Н. Методы теории функций комплексного переменного в механике растущих тел // Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия. 2004. № 4 (34). С. 82–98.
4. Манжиров А.В., Паршин Д.А. Наращивание вязкоупругого шара в центрально-симметричном силовом поле // Изв. РАН. МТТ. 2006. № 1. С. 66–83.
5. Манжиров А.В., Паршин Д.А. Моделирование процессов наращивания цилиндрических тел на вращающейся оправке с учетом действия центробежных сил // Изв. РАН. МТТ. 2006. № 6. С. 149–166.
6. Манжиров А.В., Паршин Д.А. Возведение арочной конструкции с использованием аддитивной технологии под действием силы тяжести // Изв. РАН. МТТ. 2015. № 5. С. 94–107.
7. Манжиров А.В., Паршин Д.А. Влияние режима возведения на напряженное состояние вязкоупругой арочной конструкции, возводимой с использованием аддитивной технологии под действием силы тяжести // Изв. РАН. МТТ. 2015. № 6. С. 69–91.
8. Манжиров А.В., Паршин Д.А. Применение преднапряженных конструктивных элементов при возведении тяжелой вязкоупругой арочной конструкции с использованием аддитивной технологии // Изв. РАН. МТТ. 2016. № 6. С. 93–104.
9. Паршин Д.А. Аналитические решения задачи об аддитивном формировании неоднородного упругого шарового тела в произвольном нестационарном центральном поле сил // Изв. РАН. МТТ. 2017. № 5. С. 70–82.
10. Parshin D.A. The technological stresses in a vaulted structure built up on a falsework // *Advanced Structured Materials*. 2017. Vol. 46. Pp. 377–386.
11. Parshin D.A., Nakobyan V.N. Additive manufacturing of a cylindrical arch of viscoelastic aging material under gravity action at various modes of the process // *Procedia IUTAM*. 2017. Vol. 23. Pp. 66–77.
12. Parshin D.A., Manzhirov A.V. The mechanical problems on additive manufacturing of viscoelastic solids with integral conditions on a surface increasing in the growth process // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 991. 012063.
13. Parshin D.A. Impact of the rate of the additive process of forming a heavy structure deforming in creep on the development of its technological stresses // *AIP Conference Proceedings*. 2018. Vol. 1959. 070029.
14. Manzhirov A.V., Parshin D.A. Mechanical modelling of AM processes for centrifugal deposition of viscoelastic material layers on a cylindrical mold // *Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The World Congress on Engineering 2018, 4–6 July, 2018, London, U.K.* Pp. 830–835.
15. Parshin D.A., Gupta N.K. Additive manufacturing in civil engineering // *IUTAM Symposium on Mechanical design and analysis for AM technologies. Symposium materials* / Eds. A.V. Manzhirov and E.V. Murashkin. IPMech RAS, Moscow, 2018. Pp. 44–47.
16. Manzhirov A.V., Parshin D.A. Analytical solution of the mechanical problem on additive thickening of aging viscoelastic tapers under nonstationary longitudinal end forces // *Engineering Letters*. 2018. Vol. 26, No. 2. Pp. 267–275.
17. Ашкенази Е.К., Ганов Э.В. Анизотропия конструкционных материалов: Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1980. 247 с.

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОГО ВАКУУМА И ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМГ6

Полянская Л.В., Гавриков А.Г.

Научный руководитель — доцент, к.т.н. Воронин С.В.

Самарский университет, Самара

E-mail: Polyanskaya-Lyudmila@list.ru

Для создания новейших перспективных ракетоносителей и космических аппаратов важно знать эксплуатационные свойства и размерную стабильность материалов в условиях космической среды. К факторам космического пространства, в основном, относят вакуум, повышенные и пониженные температуры, ионизационные излучения, воздействие атомарного кислорода и т.д. При проектировании и создании космических аппаратов часто используются алюминиевые сплавы. Поэтому целью данной работы является исследование влияния высокого вакуума при повышенных температурах на механические свойства алюминиевого сплава АМг6. Данный сплав обладает хорошей свариваемостью, удовлетворительными механическими свойствами и малой плотностью. Поэтому данный сплав широко используется при создании космической техники.

Исследования проводились на установке «АЛА-ТОО» типа ИМАШ-20-75, которая используется для проведения испытания образцов на одноосное растяжение при атмосферном давлении, в вакууме, при повышенных и пониженных температурах. Испытанию подвергались образцы из сплава АМг6 с размерами рабочей части 18,5x3,0x2,0 мм. При подготовке к испытаниям на образцах отмечалась начальная расчетная длина согласно ГОСТу 11701-84. Образцы подвергались одноосному растяжению со скоростью деформирования 6,35 мм/час, при температурах 20°C, 100°C и 200°C при атмосферном давлении 760 мм.рт.ст. и при вакууме со степенью разряжения $5,2 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст. После установки образцов в захваты растягивающего устройства в вакуумной камере, в течении 50-60 минут, за счет ротационного вакуумного насоса и диффузионного вакуумного насоса создавалась степень разряжения равная $5,2 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст. Затем, в случае испытаний при температуре 100°C и 200°C, был включен режим нагрева образца. Выдержка образцов при высокотемпературных испытаниях составляла 30 мин, затем начиналось растяжение образцов. Относительное удлинение определялось путем замера конечной расчетной длины образца после испытания. В процессе проведения испытаний были получены диаграммы растяжения, при помощи которых определяется предел текучести и предел прочности материала.

При анализе полученных результатов видно, что при атмосферном давлении с повышением температуры с 20°C до 100°C наблюдается уменьшение предела текучести со 110 МПа до 90 МПа, предела прочности с 190 МПа до 170 МПа и увеличение относительного удлинения с 17,5 % до 27 %. При повышении температуры со 100°C до 200°C отмечено уменьшение предела текучести с 90 МПа до 70 МПа, предела прочности с 170 МПа до 80 МПа, относительное удлинение увеличилось с 27 % до 38,5 %, что соответствует установленным закономерностям деформационного поведения и изменения механических свойств с увеличением температуры.

При проведении испытаний в вакууме с повышением температуры с 20°C до 100°C не наблюдается изменения величины предела текучести. Однако, предел прочности уменьшился с 230 МПа до 210 МПа и наблюдается увеличение относительного удлинения с 18,0 % до 25,0 %. При повышении температуры со 100°C до 200°C наблюдается снижение предела текучести с 130 МПа до 100 МПа, предела прочности с 210 МПа до 110 МПа и наблюдается увеличение относительного удлинения с 25,0 % до 47,5 %.

При 20°C с понижением давления наблюдается увеличение предела текучести со 110 МПа до 130 МПа, предела прочности – со 190 МПа до 230 МПа, относительное удлинение – с 17,5 % до 18,0 %. При 100°C с понижением давления наблюдается увеличение предела текучести с 90 МПа до 130 МПа, предела прочности – со 180 МПа до 210 МПа, снижение относительного удлинения – с 27 % до 25 %. При 200°C с понижением давления

наблюдается увеличение предела текучести с 70 МПа до 100 МПа, предела прочности – с 80 МПа до 110 МПа, снижение относительного удлинения – с 38,5 % до 47,5 %.

В процессе исследования выявлено влияние высокого вакуума на механические свойства алюминиевого сплава АМг6. Установлено, что в вакууме при 20°С происходит увеличение предела текучести на 18 %, предела прочности на 21 %, относительного удлинения на 2,8 % по сравнению с испытанием при атмосферном давлении. В вакууме при 100°С предел текучести увеличился на 44 %, предел прочности – на 17 %, относительное удлинение уменьшилось на 8 %, при 200°С предел текучести увеличился на 42%, предел прочности – на 37%, относительное удлинение уменьшилось на 23 %.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПРОКАТКЕ ТОЛСТЫХ ЛИСТОВ

Постыляков А.Ю., Мотырева Т.А.

ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель доцент, к.т.н. Инатович Ю.В.

E-mail: a.i.postyliakov@urfu.ru

Приведены результаты моделирования процесса прокатки толстых листов из титановых сплавов на реверсивном стане, полученные с использованием метода конечных элементов. Рассмотрен процесс прокатки из исходных слябов разной толщины. Установлено, что деформированное состояние металла характеризуется неравномерным распределением деформаций по высоте, а их минимальная величина находится на центральной оси раската. Как следствие, напряженное состояние характеризуется наличием значительных растягивающих напряжений в центре прокатываемых полос, что может быть причиной разрушения металла в очаге деформации.

Введение. Экспериментальные и теоретические исследования процесса прокатки толстых листов и плит показывают, что напряженно-деформированное состояние при прокатке в случае высокого очага деформации довольно неоднородно [1], что сказывается и на особенностях расчета энергосиловых параметров [2].

В настоящее время конкурентоспособным видом продукции являются толстые листы из титановых сплавов, которые прокатывают на реверсивных станах кварто. При большой толщине полосы деформация сжатия слабо проникает в срединные слои металла. Такое неравномерное распределение высотной деформаций характерно для первых проходов при толстолистовой прокатке и служит причиной возникновения продольных растягивающих напряжений в центральных слоях полосы вплоть до поперечных их надрывов, а также уменьшения ширины полосы в средней части (происходит поперечная утяжка). К такому случаю может быть отнесен случай прокатки толстых широких листов, когда $b/l_d > 5$, а фактор формы очага деформации $l_d/h_{cp} < 1$, где b – ширина прокатываемой полосы; l_d и h_{cp} – соответственно длина, и средняя высота очага деформации.

Количественное определение напряженно-деформированного состояния металла во всем объеме очага деформации относится к числу наиболее сложных теоретических задач. В тех случаях прокатки, когда деформация близка к плоской ($b/l_d > 5$), эта задача решалась методом построения линий скольжения (методом характеристик) [3, 4]. Более точные решения можно получить путем моделирования процесса методом конечных элементов (МКЭ), который реализован в программном комплексе DEFORM. Результаты расчётов с применением этого пакета программ позволяют подробно исследовать процесс деформации при различных исходных параметрах. Ниже приведены результаты исследования НДС в первом проходе сляба из титанового сплава на толстолистовом стане 2000.

Постановка задачи. Пластическая модель сляба сформирована из 4-х узловых билинейных элементов, модель валка – абсолютно жёсткая. Решение задачи произведено за 300 шагов, каждый из которых соответствовал временному интервалу 0,005 секунды. Для обеспечения стабильного захвата в начальный момент прокатки использован толкатель, имитирующий работу рольганга прокатной клетки. Скорость движения толкателя устанавливалась 0,1 м/с, вследствие чего, после захвата он отставал от сляба и не оказывал воздействия на процесс деформации. Расчёт производили для прокатки сляба толщиной 300 мм при температуре 1100 °С за один проход с обжатием от 0,4 до 13 мм и линейной скоростью валков 1,5 м/с в изотермических условиях. В качестве материала рассматривался титановый сплав 6Al4V.

Для описания контакта между валком и слябом использована модель сухого трения $\tau = \mu p$, где τ – напряжение сдвига, μ – коэффициент трения, p – среднее контактное давление. При этом коэффициент трения выбран 0,3.

Выбранные для сляба элементы представляли собой квадраты, стороны которых параллельны осям координат, все элементы имеют одинаковый размер. Поскольку размер элементов может повлиять на результаты расчёта, выбран следующий вариант дисперсности сетки:

| Количество элементов на $\frac{1}{2}$ толщины сляба, шт. | Количество элементов на $\frac{1}{2}$ объема сляба, шт. | Размеры элемента, мм |
|--|---|----------------------|
| 40 | ≈ 10000 | 3,75x3,75 |

Цель моделирования заключалась в исследовании влияния фактора формы очага деформации l_d / h_{cp} на характер распределения напряженно-деформированного состояния в раскате при различных значениях толщины сляба h_0 . Был разработан план полного численного эксперимента, показанный в таблице.

Таблица – План вычислительного эксперимента

| Параметры | | h_0 , мм | | |
|----------------|------|------------|-----|-----|
| | | 300 | 240 | 180 |
| l_d / h_{cp} | 0,05 | + | + | + |
| | 0,10 | + | + | + |
| | 0,20 | + | + | + |
| | 0,30 | + | + | + |

Выбранные уровни параметра l_d / h_{cp} соответствуют определенным значениям абсолютного Δh и относительного ε обжатий. Например, при $h_0 = 300$ мм:

| l_d / h_{cp} | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,3 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|
| Δh , мм | 0,6 | 2,4 | 9,3 | 2,2 |
| ε | 0,002 | 0,008 | 0,031 | 0,067 |

Результаты моделирования. В результате расчетов в соответствии с планом эксперимента установлено следующие.

Деформированное состояние. Характер распределения эквивалентной деформации по высоте полосы показан на рис. 1.

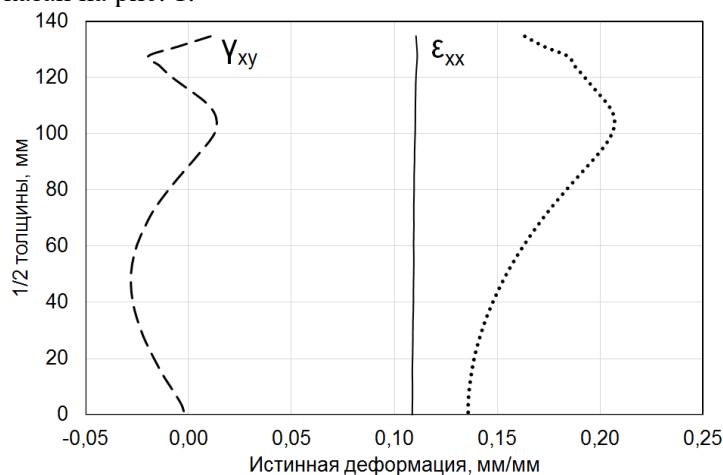


Рис. 1. Распределение деформаций по толщине после прохода

Видно, что линейная деформация ε_{xx} уменьшается по направлению к середине раската, однако её неравномерность незначительна. Сдвиговая деформация γ_{xy} в различных слоях по толщине принимает как положительные, так и отрицательные значения, а её неравномерность заметно больше, чем у линейной деформации. Следовательно, сдвиговая деформация вносит основной вклад в распределение эквивалентной деформации за счёт изменения знака в очаге прокатки (рис. 2).

Как видно на рис. 2, в приконтактной области (зона Б) заметно влияние зоны прилипания на минимальное значение сдвиговой деформации. Минимум, который вероятно должен находиться в нейтральном сечении, «срезан» и сдвинут в зону отставания. Постепенное уменьшение влияния контактного трения по направлению к зоне (В) способствует формированию максимума ближе к нейтральному сечению. Минимальные значения сдвиговых деформаций принимают в интервале значений 0,05, после чего плавно затухают до нуля к середине раската.

Напряженное состояние. В результате моделирования определили продольные напряжения σ_{xx} , возникающие на поперечной оси симметрии сляба ($z = 0$). В качестве примера, на рис. 3 показан характер изменения этих напряжений по высоте сляба для случая прокатки при

$$h_0 = 300 \text{ мм}, l_d / h_{cp} = 0,20.$$

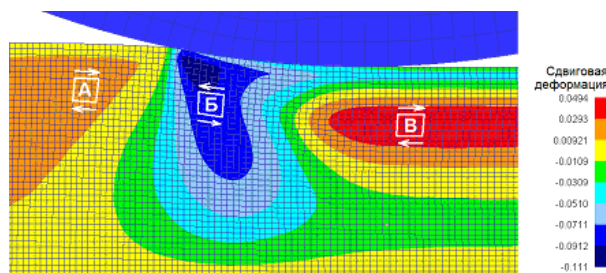


Рис. 2. Изменение сдвиговой деформации в проходе

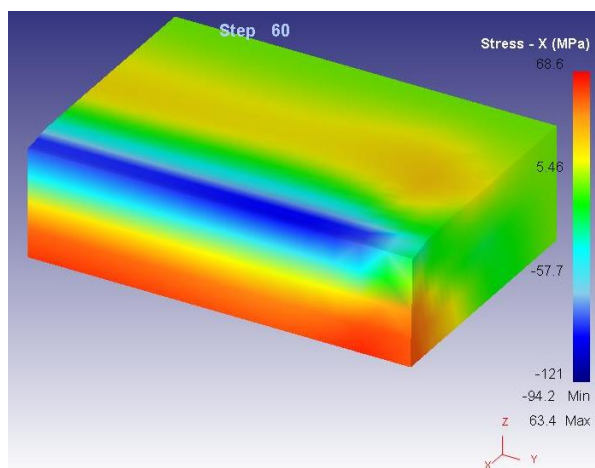


Рис. 3. Распределение напряжений σ_x по высоте сляба (показана четвертая часть поперечного сечения сляба)

Полученные результаты моделирования позволяют сделать следующие выводы:

1. Во всем диапазоне параметров, при которых проведено моделирование, в центральной области сляба возникают растягивающие напряжения. Это качественно согласуется с известными результатами оценки деформированного состояния полосы [4].
2. Наибольшие продольные растягивающие напряжения σ_x возникают в случае прокатки сляба при значениях $l_d / h_{cp} = 0,175 \div 0,225$. Величина этих напряжений прямо пропорциональна высоте сляба и достигает 68 МПа (см. рис. 3). Для деформируемого сплава 6Al4V (аналог ВТ6) при температуре 1000 °С величина временного сопротивления находится на уровне 50÷60 МПа. Таким образом, можно ожидать раскрытия сляба толщиной 300 мм из этого сплава в первом проходе во всем диапазоне значений фактора формы очага деформации.
3. При прокатке сляба толщиной 300 мм необходимо применять «замок Петрова».
4. Прокатку из сляба толщиной 240 мм целесообразно проводить при значениях l_d / h_{cp} в первых проходах 0,10÷0,15.
5. Раскрытие слябов толщиной 180 мм не прогнозируется.

Литература

1. Логинов Ю.Н., Середкина М.Ю. Исследование скоростного режима прокатки сляба из алюминиевого сплава с использованием МКЭ. Технология легких сплавов. 2015. № 3. С. 121-126.
2. Логинов Ю.Н. Анализ энергозатрат при горячей прокатке листовых полуфабрикатов из алюминия. Производство проката. 2005. № 4. С. 19-24.
3. Бровман М.Я. Усовершенствование технологии прокатки толстых листов / М.Я.Бровман, Б.Ю.Зеличенко, А.И.Герцев. М.: Металлургия, 1968. 252 с.
4. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Учебник для вузов. М.: Металлургия, 2000. 688 с.

РАЗРАБОТКА ДВУХОПЕРАЦИОННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ХОЛОДНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ МОНТАЖНЫХ ЧАСТЕЙ ВОДООТВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Поцелуев К.О.

Научный руководитель — проф., д.т.н. Панфилов Г.В.

ТулГУ, каф. МПФ

E-mail: constantin.potseluev@yandex.ru

В настоящее время все большее значение в различных отраслях народного хозяйства приобретают быстровозводимые металлические конструкции, монтируемые из профилированных секций. В частности, широко применяются различные варианты металлических сборных гофрированных водоотводных трубопроводов, прокладываемых вдоль железнодорожных и автомагистралей, зернохранилищ башенного типа, а также других спортивных, сельскохозяйственных и промышленных сборных сооружений.

Анализ рынка показал, что основными поставщиками указанной трубной продукции являются: «Трубная металлургическая компания», «Объединенная металлургическая компания», Челябинский трубопрокатный завод», акционерное общество «Северсталь», ЗАО «Гофросталь», международная фирма «Виа Кон Технология», а также ОАО «Алексинстройконструкция», с которым имеются договоренности и предварительное соглашение о намерениях по совместному проведению НИР по тематике данного проекта. Проанализирована стоимость с учетом НДС за тонну гофрированных металлических сборных труб в зависимости от различных параметров, а также распределение этой стоимости по отдельным элементам и составляющими технологии изготовления. Из представленного видно, что значительную долю цены представляет стоимость крепежного метиза, то есть болтов и гаек со сферическими опорными поверхностями, изготавливаемого по специальным заказам. Также, при этом, возникают определенные сложности с проведением сборочных работ.

Предлагается заменить дорогостоящий специальный метиз обычными стандартными болтами и гайками, добавив в соединение разработанную конструкцию сферической шайбы, изготавливаемую из некратных отходов листа после его раскроя на карты-заготовки волнообразных профилированных секций. Экспериментально установлено, что применение рассматриваемых позволяет значительно компенсировать погрешности соосности монтажных отверстий и прочих конструктивных элементов изготовленных секций. Это обеспечивается возможностью радиального смещения шайбы относительно пары болт-гайка, исключая угловые отклонения этой пары при затяжке и повышая плотность и прочность соединения.

В результате проведенного комплекса теоретических, экспериментальных и технологических исследований был предложен процесс холодного деформирования деталей типа «шайба», имеющих сферические части, в начале производится вырубка контура, далее идет формоизменение округлой формы и кольцевой части, на второй операции идет деформация шайбовидной части. Для реализации разработанного двухоперационного технологического процесса был спроектирован двухрядный двухпозиционный автоматизированный штамп, предусматривающий отработку технологических режимов процесса и изготовление относительно небольших партий. Отличительными патентоспособными признаками данного штампа являются оригинальные конструкции таких подвижных регулируемых узлов штампа как: механизм захвата полосы при загрузке; механизм перемещения полосы в рабочей зоне штампа с «ломающимся» подающим рычагом; подпружиненная и имеющая вертикальное перемещение направляющая планка.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЖСЛОЕВОЙ ПРОЧНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМОСТЕКЛОПЛАСТИКА

Прокудин О.А., Добрянский В.Н.

Научный руководитель — к.ф.-м.н. Соляев Ю.О.

МАИ

E-mail: Prokudin_7713@mail.ru

Композиционные материалы на основе алюмопластика применяются в конструкциях летательных аппаратов и характеризуются повышенной стойкостью к развитию усталостных трещин, повышенной ударпрочностью, огнестойкостью, более высокой удельной прочностью по сравнению с алюминиевыми сплавами. Эти материалы представляют собой слоистые композиты, образованные чередующиеся слоями из алюминиевых сплавов и пластика.

Основной задачей настоящей работы было определение межслоевой прочности материала. Межслоевая прочность оценивалась путем проведения испытания на трехточечный изгиб образцов с различным количеством слоев и различным расстоянием между опорами. На образцах с количеством слоев $3/2$ (3 слоя алюминия и 2 пластика) замерить межслоевую прочность не удалось, так как механизм разрушения материала характеризовался закручением от нормальных растягивающих напряжений. Для образцов с большим количеством слоев $9/8$, было выявлено изменение механизма разрушения, а именно расслоение в центральной части образца, в случае расстояния между опорами, порядка, 25-40 мм, при общей толщине образцов 5,5 мм. При этом, в ходе эксперимента, образцы алюмопластика разрушались после перехода алюминиевых слоев в зону пластических деформаций. Кроме этого, был выявлен эффект зависимости предельной нагрузки от расстояния между опорами, в том числе, для коротких образцов, разрушающихся по механизму межслоевого сдвига. Поэтому, фактически, при обработке экспериментальных данных с использованием соотношений классической балочной теории определялась, так называемая, кажущаяся межслоевая прочность.

Попытка точной идентификации межслоевой прочности была реализована с использованием расчетов в рамках более сложных моделей. Во-первых, было реализовано численно-аналитическое моделирование на основе упруго-пластической модели слоистой балки Тимошенко, которое, однако, не позволило объяснить наблюдаемые эффекты зависимости кажущейся прочности от расстояния между опорами. Численное конечно-элементное моделирование показало, что уровень касательных напряжений может зависеть от расстояния между опорами в рассмотренных материалах с анизотропией упругих свойств, что может служить объяснением наблюдаемых в эксперименте результатов. Для получения соответствующих уточненных аналитических оценок предложено использовать балочные модели повышенного порядка, учитывающие обжатие (сжимаемость) балки по толщине.

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

Прохоров Е.С.

ФГБОУ ВО ТГПУ им. Л.Н. Толстого,

E-mail: lukienko_lv@mail.ru

Представлены результаты модельных испытаний по оценке эффективности триботехнических составов для восстановления деталей сельскохозяйственной техники. Исследования были проведены при взаимодействии стальных дисков диаметром 60 мм, выполненных из различных сталей с различными режимами термообработки. Результаты экспериментов могут быть использованы для восстановления изношенных деталей сельскохозяйственной техники, которая работает в сложных условиях абразивно-механического изнашивания.

Почвообрабатывающая сельскохозяйственная техника работает в сложных условиях переменных рабочих нагрузок, при высоких скоростях, а также при, практически, любых погодных условиях. Кроме того, цены на новую сельскохозяйственную технику в настоящее время очень высоки. Поэтому необычайно актуальным является вопрос ресурсосбережения машин и механизмов почвообрабатывающей техники. Основной наиболее сложной машиной, которая подвержена наиболее интенсивным нагрузкам, является трактор, на котором смонтировано различное навесное оборудование непосредственно взаимодействующее с обрабатываемой почвой. В связи с этим, избранная тема исследований, посвящённая совершенствованию методов восстановления изношенных деталей тракторов является актуальной.

Проведённый анализ литературы показал, что наиболее интенсивному износу могут быть подвержены зубья шестерен, посадочные поверхности под подшипники качения на валах силовой передачи и в планетарных механизмах.

Специалистами НПИФ "ЭНИОН - БАЛТИКА" разработан и запатентован [1, 2] триботехнический состав (ТС) НИОД ТУ-0254-001-23124986-93, применение которого позволяет добиться антифрикционного эффекта в любых парах трения, возникающего за счет модифицирования триботехнических свойств трущихся поверхностей. Основное отличие НИОДа от различных присадок к смазкам состоит в том, что он внедряется в приповерхностные слои под действием взаимного контактного давления двух соприкасающихся деталей.

Использование ТС НИОД позволяет распределить нагрузки по всей поверхности трения, что ведет к работе механизма в оптимальных условиях, способствующих увеличению его ресурса в 2,5 раза. Для обеспечения эффективной работы необходимо активировать триботехнический состав на парах трения под рабочими нагрузками (не менее 70% от рабочих) определённое время, после чего остатки НИОД должны быть удалены из механизма.

Обрабатываемый металл за счет применения ТС НИОД приобретает очень низкий коэффициент трения: 0.007; микротвердость контактирующих поверхностей: 690 – 710 НВ; ударная прочность: 50 кг/мм; высокая коррозионная стойкость. При этом: стоимость восстановления по ТС НИОД технологии в 10-15 раз ниже стоимости капремонта; ремонт производится в режиме штатной эксплуатации, не требует специального оборудования и помещения, наличия запасных частей; ТС НИОД технология позволяет заменить плановые ремонты предупредительной ТС НИОД-обработкой со значительным увеличением ресурса; наличие металлокерамических покрытий на поверхности трения приводит к снижению коэффициента трения и потребления электроэнергии и топлива на 10-20%, а при определенных условиях и более; увеличивается срок службы смазок в 10 раз и более, т.к. защита от износа осуществляется новым покрытием, а не маслом.

Для того чтобы произвести обработку изношенного узла механизма трактора нужно обеспечить доступ определенного количества НИОД к трущимся поверхностям и продолжить эксплуатацию агрегата в нормальном режиме в течение некоторого времени. По окончании этого периода остатки вещества удаляются и механизм готов к работе.

Современные трактора работают в сложных условиях, характеризующихся значительной динамической нагрузкой, обусловленной силами сопротивления, возникающими на рабочих

органах, нелинейностью сил трения а также наличием абразива в зоне контакта механизмов трактора, что приводит к преждевременному их изнашиванию.

Одним из путей увеличения ресурса механизмов тракторов, а также снижения затрат на ремонт является применение триботехнических составов (ТС) НИОД разработки НИИФ «Энион-Балтика» и ППМ-21 (разработчик НИИХИММАШ) в качестве антифрикционной присадки к смазке.

Для подтверждения эффективности применения ТС НИОД и ТС ППМ-21 были проведены сравнительные экспериментальные исследования на модельных триботехнических системах (ТТС). Для тракторов характерны триботехнические системы, в которых реализовано трение качения с проскальзыванием (зубчатые передачи в редукторах). Поэтому в качестве объекта исследования была принята модельная триботехническая система диск – диск.

Исследования были выполнены с использованием трибометра СМЦ-2, работающего по схеме с замкнутым кинематическим контуром. В модельной ТТС трение качения с проскальзыванием было достигнуто за счёт разности частоты вращения образца и контртела. Образцы обкатывались при нормальной нагрузке $F=200Н$, затем образцы обезжиривались для удаления продуктов износа и смазочных материалов. Таким образом, исследования модельных ТТС проводились в условиях сухого трения.

Кроме того, использование триботехнических составов оказывает существенное влияние на формирование эксплуатационной шероховатости поверхности трения. Параметр шероховатости R_a при обработке ТС НИОД (ТС ППМ-21) снижается для стали 45 на 62% (42%), для стали 20 на 7%(9%), для стали 20Х2Н4А на 31% (10%), для стали 30ХГСА на 20% (22%). Это обстоятельство связано, по-видимому, с пластифицированием материала в зоне пятна контакта, а также с эффектом облегчения прирабатываемости поверхности образца под влиянием компонентов триботехнических составов.

На первом этапе эксперимента одна пара образцов была обработана консистентной смазкой ЛИТОЛ, а другая ТС НИОД, растворённым в ЛИТОЛЕ. Анализируя полученные результаты, можно отметить, что после обработки испытуемых деталей в ТС ЛИТОЛ+НИОД на первом этапе эксперимента при механическом изнашивании, когда в контактной зоне присутствует слой консистентной смазки ЛИТОЛ интенсивности изнашивания материалов обработанных ТС НИОД с ЛИТОЛ и одной смазкой ЛИТОЛ соизмеримы. В процессе эксперимента при контактном взаимодействии под нагрузкой, а также при обезжиривании образцов перед взвешиванием происходит удаление масляной плёнки, после чего интенсивность изнашивания возрастает в 2...6 раз (когда для смазки использован только один ЛИТОЛ).

Необходимо отметить, что применение ТС НИОД также способствует снижению коэффициента трения. Так, по результатам эксперимента в паре трения, обработанной ТС НИОД, коэффициент трения в среднем был в 3.2 раза меньше, чем в паре трения, обработанной ЛИТОЛ.

Установленное влияние триботехнических составов на микротвёрдость и топографию поверхности трения интегрально проявляется в эффекте снижения интенсивности изнашивания образцов, обработанных в модельных триботехнических системах. Интенсивность изнашивания может быть описана уравнением регрессии (коэффициент детерминации составляет $R^2=0,7462$):

$$I = 2 \cdot 10^{-5} \cdot S^3 - 0,0009 \cdot S^2 + 0,0102 \cdot S - 0,0044$$

где S – путь трения, м.

При абразивном изнашивании на первом этапе эффективность применяемых триботехнических составов примерно одинакова, тогда как на втором участке (установившееся изнашивание) эффективность применения НИОД несколько выше.

Таким образом, проведённый комплекс ускоренных модельных экспериментальных исследований позволяет сделать следующие выводы о перспективности применении триботехнических составов: значительно уменьшается износ пар трения, следовательно увеличивается ресурс работы машин; снижается тепловыделение; уменьшается шероховатость рабочих поверхностей, а значит снижается потребление электрической

энергии; НИОД оказывает более позитивное воздействие на такие характеристики поверхностных слоев как шероховатость и микротвердость.

Литература

1. О применении триботехнических составов для повышения ресурса тяжело нагруженных деталей машин / Б.П. Сафонов, С.Г. Трещёв, Л.В. Лукиенко, В.Д. Сазонов // Вестник машиностроения, №6, 2003, с. 39-43
2. Патент № 2057257. Способ формирования покрытия на трущихся поверхностях / Голубицкий А.И., Казарезов В.В., Уткин Н.В., Хренов А.Ю. от 27.03.1996
3. Розенберг Ю.А. Влияние смазочных масел на долговечность и надёжность деталей машин / Ю.А. Розенберг. – М.: Машиностроение, 1970. – 304 с.
4. Чулкин С.Г. Оценка влияния смазочных материалов на триботехнические характеристики пар трения / С.Г. Чулкин, И.В. Соловьёва, А.Д. Бреки, Р. Качиньски // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. Трудов 7-й Междунар. науч.-техн. конф. В 3-х т. Т.2 / под общ. Ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика. – Новополоцк: ПГУ, 2009. – С. 19 – 22.
5. Шорина Н.С. Триботехническое материаловедение и триботехнология: учеб. пособие/Под общей редакцией Н.Е.Денисовой. –Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006. – 248 с.

ПОСТРОЕНИЕ КРИВЫХ ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ С УЧЕТОМ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ СТРУКТУРЫ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА

Разживин В.А., Петров И.Н., Сурудин С.В.

Научный руководитель – доцент, к.т.н. Ерисов Я.А.
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева, Самара
vasia.razzhivin@yandex.ru

В технологических расчетах процессов формообразования деталей летательных аппаратов, двигателей и других изделий машиностроения до сих пор используются соотношения теории пластичности, основанной на феноменологическом подходе и гипотезе сплошной (бесструктурной) среды, куда не входят параметры кристаллографической текстуры и константы кристаллической решетки, являющиеся физической основой прочности, пластичности и анизотропии свойств заготовок [1-5]. В связи с этим объектом исследования являлся расчет кривых предельных деформаций материала с целью вывода соотношений для их расчета на основании моделей пластического деформирования Хора [6-7], и критерия пластичности, учитывающего в явном виде константы кристаллической решетки и ориентационные факторы текстуры [8-9].

В качестве объекта исследования взят материал марки М1. После прокатки у данного материала преобладают ориентировки деформационного типа: $\{112\}\langle 111\rangle$ (медь), $\{110\}\langle 112\rangle$ (латунь), $\{123\}\langle 634\rangle$ (S) и $\{100\}\langle 011\rangle$ («куб на ребре»); в отожженных листах преимущественными являются ориентировки рекристаллизационного типа: $\{100\}\langle 001\rangle$ (кубическая) и $\{110\}\langle 001\rangle$ (Госса).

Для рассматриваемых ориентировок были построены кривые предельных деформаций для различных кристаллографических ориентировок на основании модели Хора. Однозначно назвать ориентировку, обеспечивающую наилучшие деформационные возможности невозможно, так как предельные параметры деформирования зависят от конкретной технологической операции листовой штамповки, так при линейном растяжении, соответствует операции обтяжки, наилучшей ориентировкой является ориентировка «Госса», но при двухосном растяжении (вытяжка, формовка) материал с данной ориентировкой показывает наихудшие показатели. При двухстороннем растяжении наилучшей ориентировкой является ориентировка «куб на ребре», при одностороннем растяжении наихудшие показатели у ориентировок деформационного типа.

Литература

1. Q. T. Pham and Y. S. Kim, "Evaluation of Press Formability of Pure Titanium Sheets", Key Engineering Materials, Vol. 716, pp. 87-98, 2016
2. S. P. Keeler, W. A. Backhoffen, Plastic instability and fracture in sheet stretched over rigid punches, ASM Trans. Q., 56 (1964), 25-48.
3. G. M. Goodwin, Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop, J. SAE Tech., no. 680093(1968).
4. Banabic, D. An improved analytical description of orthotropy in metallic sheets / D. Banabic, H. Aretz, D.S. Comsa, L. Paraianu // International Journal of Plasticity. – 2005. – Vol. 21. – pp. 493-512.
5. Bron F., Besson J. A yield function for anisotropic materials. Application to aluminum alloys // Int. J. Plasticity.- 2003. – pp. 937-963.
6. P. Hora, L. Tong, J. Reissner, A prediction method for ductile sheet metal failure using FE-simulation, NUMISHEET 1996, 252-256.
7. P. Hora, L. Tong, J. Reissner, Mathematical prediction of FLC using macroscopic instability criteria combined with micro structural crack propagation models, Plasticity conference, 2003,364-366.

8. Erisov Y.A., Grechnikov F.V., Surudin S.V. Yield function of the orthotropic material considering the crystallographic texture // Structural Engineering and Mechanics. -2016. - Vol. 58. - Issue 4. - pp. 677-687.
9. Ерисов Я.А., Гречников Ф.В., Сурудин С.В. Критерий пластичности анизотропной среды с учетом кристаллографии структуры и его экспериментальная проверка // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2016. - Т. 14. №4. - с. 42-49.

ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОТКЛИКА МЕЗОУРОВНЯ В ДВУХУРОВНЕВЫХ МОДЕЛЯХ ПОЛИКРИСТАЛЛА К ВОЗМУЩЕНИЯМ ОРИЕНТИРОВОК КРИСТАЛЛИТОВ

Романов К.А., Швейкин А.И.

ПНИПУ, Пермь

E-mail: k.a.kriv@mail.ru

С использованием двухуровневой модели неупругого деформирования поликристаллических металлов проведен анализ влияния ориентировок кристаллитов на реализацию механизмов деформирования. Проведена оценка чувствительности отклика мезоуровня к вносимым возмущениям в ориентировки кристаллитов, выявлены существенно чувствительные к возмущениям ориентировки кристаллитов.

В ГПУ-кристаллитах даже при незначительных изменениях воздействий может наблюдаться смена сценария деформирования: различным образом может осуществляться внутризеренное дислокационное скольжение, двойникование, развороты решетки [1].

В двухуровневых статистических моделях, основанных на физических теориях пластичности, указанные механизмы учитываются в соотношениях мезоуровня – для отдельных кристаллитов, состояние которых принимается однородным [2]. Важным вопросом является анализ чувствительности таких математических моделей к параметрам модели и воздействий [3], для ГПУ-поликристаллов этот вопрос в связи с вышеприведенным особенно актуален.

В данной работе использовалась двухуровневая модель ГПУ-кристаллита [1] и анализировалось влияние изменения ориентировок кристаллитов на отклик мезоуровня (напряжения) и реализацию механизмов деформирования, для чего использовался следующий алгоритм.

Положение кристаллографической системы координат отдельного кристаллита (элемента мезоуровня) относительно лабораторной задается с помощью ориентационного ортогонального тензора \mathbf{o} . На основе тензора \mathbf{o} базовой ориентации строится возмущенный ориентационный тензор $\tilde{\mathbf{o}} = \Delta \mathbf{o} \cdot \mathbf{o}$, где $\Delta \mathbf{o}$ – тензор малого поворота, близкий к единичному, который задается с помощью трех случайных углов Эйлера из диапазона $[-\Delta; \Delta]$, где Δ принимается в данной работе равным $1^\circ, 3^\circ, 5^\circ$.

Для разных реализаций возмущенных ориентационных тензоров проводится расчет напряжений σ_k , где k – номер реализации. И в каждом случае находится отклонение истории изменения отклика σ при возмущенном $\tilde{\mathbf{o}}$ от истории изменения отклика σ_0 при фиксированном \mathbf{o} (по норме Чебышева):

$$\|\sigma_k(t) - \sigma_0(t)\| = \max_t \left[\max_{1 \leq i < j \leq 3} \sum_{j=1}^3 |\sigma_{(k)ij}(t) - \sigma_{(0)ij}(t)| \right]. \quad (1)$$

Затем определяется оценка чувствительности $M_o(\Delta)$ для данной базовой ориентировки как максимальное отклонение по реализациям,

$$M_o(\Delta) = \max_{k=1, K} \{\|\sigma_k(t) - \sigma_0(t)\|\}. \quad (2)$$

и относительная оценка $M_{отн}(\Delta) = M_o(\Delta) / \|\sigma_0(t)\|$, где $\|\sigma_0(t)\| = \max_t \left[\max_{1 \leq i < j \leq 3} \sum_{j=1}^3 |\sigma_{(0)ij}(t)| \right]$ –

норма истории изменения отклика при базовой ориентации, при проведении расчетов K принималось равным 50.

На Рис. 1, 2 приведены графики зависимости компонент тензора напряжений от интенсивности деформации для двух случайно выбранных базовых ориентировок.

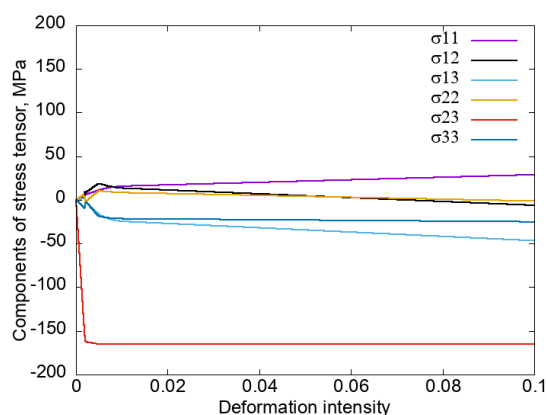


Рис. 1. Зависимость компонент тензора напряжений от интенсивности деформаций при базовой ориентировке $\varphi_1 = 43^\circ, \varphi_2 = 166^\circ, \varphi_3 = 75^\circ$

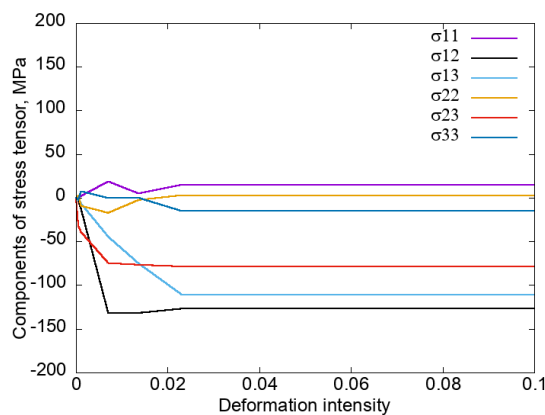


Рис. 2. Зависимость компонент тензора напряжений от интенсивности деформаций при базовой ориентировке $\varphi_1 = 275^\circ, \varphi_2 = 285^\circ, \varphi_3 = 307^\circ$

В Таблице 1 приведены оценки $M_o(\Delta)$ и $M_{отн}(\Delta)$ для трех случайно выбранных базовых ориентировок и диапазонов углов разориентировки $1^\circ, 3^\circ, 5^\circ$.

Таблица 1. Оценки $M_o(\Delta)$ и $M_{отн}(\Delta)$ для базовых ориентировок.

| Базовая ориентировка | $M_o _{\Delta=1^\circ}$ | $M_{отн} _{\Delta=1^\circ}$ | $M_o _{\Delta=3^\circ}$ | $M_{отн} _{\Delta=3^\circ}$ | $M_o _{\Delta=5^\circ}$ | $M_{отн} _{\Delta=5^\circ}$ |
|---|--------------------------|------------------------------|--------------------------|------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| $\varphi_1 = 43^\circ, \varphi_2 = 166^\circ, \varphi_3 = 75^\circ$ | 56.95 | 0.24 | 128.67 | 0.54 | 187.47 | 0.79 |
| $\varphi_1 = 275^\circ, \varphi_2 = 285^\circ, \varphi_3 = 307^\circ$ | 96.74 | 0.38 | 243.18 | 0.96 | 251.22 | 0.99 |
| $\varphi_1 = 103^\circ, \varphi_2 = 52^\circ, \varphi_3 = 36^\circ$ | 16.27 | 0.06 | 39.95 | 0.14 | 78.56 | 0.28 |

Рассмотрим детальней результаты для базовой ориентировки с углами Эйлера $\varphi_1 = 275^\circ$, $\varphi_2 = 285^\circ$, $\varphi_3 = 307^\circ$. Для данной ориентировки при диапазонах углов разориентировки Δ , равных 3° и 5° , оценка чувствительности получается достаточно большой. Это объясняется тем, что возмущение ориентировки достаточно существенное и вследствие этого изображающая точка в пространстве напряжений, получаемая в расчетах при использовании вязкопластической модели, начинает стремиться к другой вершине поверхности текучести (ПТ) [4]. Вершине ПТ, в окрестность которой приходят напряжения при реализации модели с использованием базовой ориентировки, соответствует следующий набор номеров активных систем скольжения: {1, 5, 7, 8, 24, 26}, назовем эту вершину ПТ «базовой». При возмущении ориентировки вершина поверхности текучести, в которую приходят напряжения, может измениться и, например, при определенном возмущении, соответствовать активным системам скольжения с номерами: {1, 6, 7, 8, 24}. Данная вершина достаточно близка к базовой, так как совпадают 4 активных систем скольжения – №№ 1, 7, 8, 24.

Если увеличивать диапазон возмущения углов ориентировки, то количество совпадающих активных систем скольжения для базовой вершины и вершины, в окрестность которой попадают напряжения при использовании возмущенной начальной ориентации, уменьшается. Например, для диапазона угла разориентировки $\Delta = 9^\circ$ вершина поверхности текучести, характерная для возмущенной ориентировки – {1, 6, 7, 8, 35}, содержит по

сравнению с базовой ориентировкой только 3 одинаковые активные системы скольжения – №№ 1, 7, 8. А при диапазоне возмущения $\Delta = 11^\circ$ ({6, 7, 8, 27, 35}) – только 2 одинаковые активные системы скольжения – №№ 7, 8.

В численных расчетах можно оценить также минимальный угол, при котором начинаются значительные отклонения по вершинам поверхности текучести. Выберем в качестве базовых 60 произвольных ориентировок. Для каждой базовой и возмущенной ориентировки, соответствующей определенному диапазону угла разориентировки, который затем постепенно будем увеличивать, находим вершины поверхности текучести. Сравниваем активные системы скольжения для базовой и возмущенной ориентировки. Если число совпадающих систем меньше или равно 3, то принимается, что данная ориентировка возмущена «сильнее» остальных. По числу «сильно возмущенных» ориентировок можно определить минимальный угол. В Таблице 2 приведены данные расчетов для различных диапазонов углов разориентировки.

Таблица 2. Оценка количества «сильно возмущенных» ориентировок для различных диапазонов углов разориентировки.

| Диапазон возмущений, ° | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 |
|--|---|---|---|---|----|----|----|
| Количество «сильно возмущенных» ориентировок | 1 | 3 | 4 | 9 | 11 | 14 | 16 |

Можно отметить, что при увеличении углов разориентировки сильнее отклонение вершин поверхности текучести, в окрестности которых попадают напряжения, от вершин для расчета с базовой ориентировкой.

Таким образом, возможное существенное изменение отклика (Таблица 1) при отклонении начальной ориентации вызвано тем, что поверхность текучести для ГПУ-кристаллита (особенно с учетом двойникования) имеет множество граней и вершин, переход напряжений, между окрестностями которых может быть осуществлен при незначительном изменении начальной ориентировки (или, что эквивалентно, незначительном повороте воздействия). С использованием разработанного алгоритма выявлены чувствительные в указанном смысле ориентировки кристаллитов. В настоящий момент проводится поиск данных экспериментальных исследований деформирования отдельных ГПУ-кристаллитов при разных ориентировках для подтверждения полученных численных результатов.

Стоит отметить, что определяемая чувствительность отклика макроуровня (определяется осреднением откликов мезоуровня) двухуровневой модели ГПУ-поликристалла к возмущениям воздействий существенно ниже – за счет осреднения, является приемлемой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (базовая часть государственного задания ПНИПУ, проект №9.7434.2017/8.9).

Литература

1. Мацюк К.В., Трусов П.В. Модель для описания упруговязкопластического деформирования ГПУ-кристаллов: несимметричные меры напряженно-деформированного состояния, законы упрочнения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2013. – №4. – С. 75–105.
2. Трусов П.В., Швейкин А.И. Многоуровневые физические модели моно- и поликристаллов. Статистические модели // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т.14. – №4. – С. 17-28.
3. Швейкин А.И., Шарифуллина Э.Р., Трусов П.В., Пушков Д.А. Об оценке чувствительности статистических многоуровневых моделей поликристаллических металлов к возмущениям параметров // Вычислительная механика сплошных сред. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 214-231.
4. Швейкин А.И., Шарифуллина Э.Р. Анализ конститутивных соотношений для описания внутризеренного дислокационного скольжения в рамках двухуровневой упруговязкопластической модели ГЦК-поликристаллов // Вестник Тамбовского государственного университета. – 2013. – Т.18, вып.4. – С.1665-1666.

ВЛИЯНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО СЖАТИЯ НА ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР

Рысаева Л.Х., Баимова Ю.А.

ИПСМ РАН

E-mail: lesya813rys@gmail.com

В работе представлены результаты численного моделирования деформационного поведения шести устойчивых углеродных алмазоподобных фаз на основе нанотрубок (ТА1, ТА3, ТА5, ТА6, ТА8 и ТВ). Методом молекулярной динамики изучено влияние гидростатической деформации на структурные и механические свойства углеродных алмазоподобных фаз. Структурные изменения при гидростатическом сжатии исследуются для понимания механизмов деформации. Было показано влияние температуры на ход кривых напряжение-деформация и зависимость изменения значений углов и длин связей на примере фазы ТА6.

Введение. Самым твердым материалом, известным в настоящее время, является алмаз, но в течение многих лет были приложены значительные усилия для поиска новых материалов с твердостью, превышающей твердость алмаза или близко к ней. Было показано, что различные кубические фазы, например, лонсейлит и углеродные алмазоподобные фазы, обладают необычными физико-механическими свойствами. Углеродные алмазоподобные фазы (УАФ) имеют атомы углерода с sp^3 -гибридизованным состоянием или могут включать небольшую часть sp^2 -гибридизованных атомов. Такие структуры могут быть получены различными методами, например, холодное сжатие [1], ударное сжатие поликристаллического графита [2], нагрев углеродной сажи, преобразование структур онионов под высоким давлением и т. д.

Сверхтвердые материалы имеют особое значение в промышленных применениях, таких как режущие, полировальные и сверлильные инструменты, а также для создания защитных покрытий. Уже было показано, что некоторые алмазоподобные структуры имеют твердость по Виккерсу, близкую к алмазу (96,5 ГПа) [3]. Результаты, полученные в данной области на сегодняшний день, расширяют наше понимание механических свойств алмазоподобных структур, включая их ауксетичность [4] и деформационное поведение. [5] Несколько УАФ были найдены экспериментально, и многие другие были изучены с помощью методов моделирования, таких как *ab-initio* или молекулярная динамика.

В данной работе рассмотрены УАФ на основе углеродных нанотрубок. Методом молекулярной динамики исследовано их деформационное поведение, проанализированы структурные особенности и выявлены механизмы деформации.

Методы. Для изучения были выбраны шесть устойчивых конфигураций УАФ на основе нанотрубок, которые получили общее название тубулары. На рисунке 1 представлены примеры УАФ.

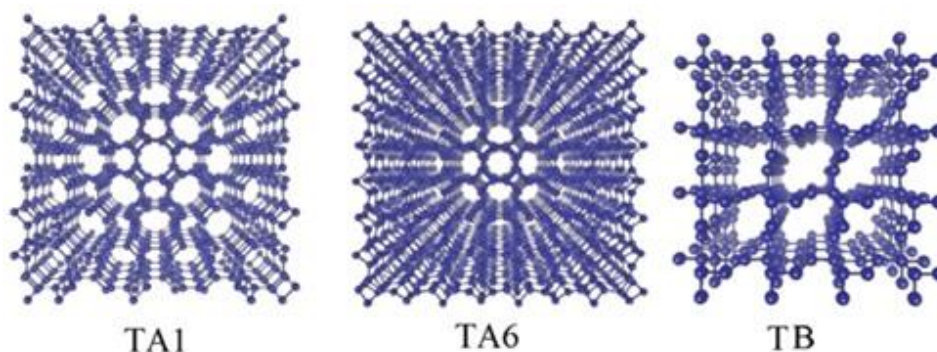


Рис. 1. Пример исследуемых УАФ

Моделирование проводилось методом молекулярной динамики с использованием свободно распространяемого пакета моделирования LAMMPS с эмпирическим потенциалом межатомного взаимодействия AIREBO. Данный потенциал был успешно использован для исследования тепловых и механических свойств различных углеродных систем. Для создания расчетных ячеек была использована собственно написанная программа, а

необходимые исходные данные координат атомов для построения структур были взяты из [6]. Сначала структура была релаксирована до глобального минимума энергии, что позволяет обнаружить устойчивые УАФ. Затем ячейка моделирования деформируется в гидростатическом режиме ($\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = \varepsilon$), где ε - параметр, монотонно уменьшающийся со скоростью деформации $0,005 \text{ ps}^{-1}$. Моделирование проводилось при двух температурах 1 К и 300 К, постоянство температуры поддерживалось с помощью термостата Носе-Хувера.

Результаты. На рисунке 2 представлена зависимость гидростатического сжатия от напряжения для устойчивых конфигураций тубуланов.

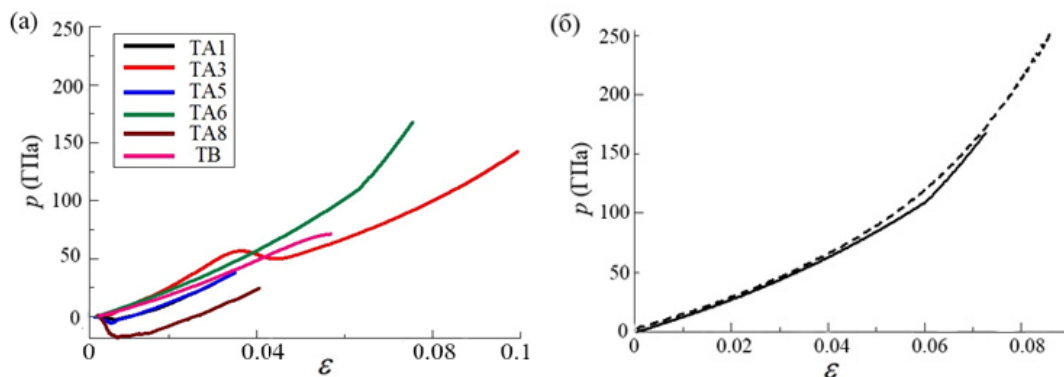


Рис.1. Кривая напряжение-деформация для всех устойчивых тубуланов при $T = 1 \text{ К}$ (а), фазы ТА6 (б) при двух температурах 1 К (сплошная кривая) и 300 К (пунктирная кривая).

Для примера подробно рассмотрим устойчивую фазу ТА6. Из графика видно, что деформация на всей области идет равномерно, и с приближением к критическому значению кривая незначительно меняет угол. Критического значения напряжения фаза достигает при $\varepsilon = \sim 0,075$ и $p = 167 \text{ ГПа}$. Так как структура сама по себе очень плотная ($\rho = 3,122 \text{ г/см}^3$), то и степень достижимой деформации не велика. Температура не вносит сильных изменений в ход деформации, только увеличивает время деформирования примерно на 18 % ($\varepsilon = 0,89$ при $p = \sim 2,6 \text{ ГПа}$). Данная фаза деформируется за счет изменения длин связей, которые уменьшаются в ходе деформации структуры, в то время как углы меняются всего на $1-2^\circ$. Также были построены функции радиального распределения, из которых видно, что структура сохраняет кристаллический порядок до высоких плотностей.

Выводы. Методом молекулярной динамики исследовано деформационное поведение устойчивых углеродных алмазоподобных фаз на основе нанотрубок при гидростатическом сжатии. Было показано, что деформация зависит от особенностей структуры исследуемого материала. Так, рассмотренная фаза ТА6 обладает высокой плотностью (по сравнению с другими стабильными фазами), в следствие чего для ее деформирования необходимо большее давление, чем для других фаз.

Литература

1. Mao W. L., Mao H.K., Eng P.J. et al. Bonding changes in compressed superhard graphite // Science. 2003. V.302, P.425.
2. Yamada K. Shock synthesis of a new cubic form of carbon // Carbon 2003. V. 41. P. 1309.
3. Andrievski R. A. Superhard materials based on nanostructured high-melting point compounds: achievements and perspectives // Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 2001. V. 19. P. 447.
4. Lisovenko D.S., Gorodtsov V.A., Baimova J.A., Rysaeva L.K., Dmitriev S.V., Rudskoy A.I. Equilibrium diamond-like carbon nanostructures with cubic anisotropy: elastic properties // Physica Status Solidi (B): Basic Solid State Physics. 2016. T. 253. № 7. С. 1295.
5. Baimova J. A., Rysaeva L. Kh, Rudskoy A.I. Deformation behavior of diamond-like phases: molecular dynamics simulation. Diamond and Related Materials. 2018. V.81. P. 154.
6. Грешняков В.А., Беленков Е.А., Березин В.М. Кристаллическая структура и свойства углеродных алмазоподобных фаз. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ.-2012. -150 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ И ЕМКОСТИ РАЗРЯДНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ОТХОДОВ ТВЕРДОГО СПЛАВА КНТ-16 В ВОДЕ ДИСТИЛЛИРОВАННОЙ

Агеев Е.В., Сабельников Б.Н.

Юго-Западный государственный университет, Курск

E-mail: eageev_ev@mail.ru, sabelnikovboris1@mail.ru

Представлено изучение влияния напряжения на электродах и емкости разрядных конденсаторов на производительность процесса электроэрозионного диспергирования отходов твердого сплава КНТ-16 в воде дистиллированной. Установлено, что производительность процесса электроэрозионного диспергирования твердого сплава КНТ-16 напрямую зависит указанных параметров.

Одним из перспективных методов получения порошка, практически из любого токопроводящего материала, в том числе и твердого сплава, отличающийся относительно невысокими энергетическими затратами и экологической чистотой процесса, является метод электроэрозионного диспергирования (ЭЭД) (рисунок 1) [1].

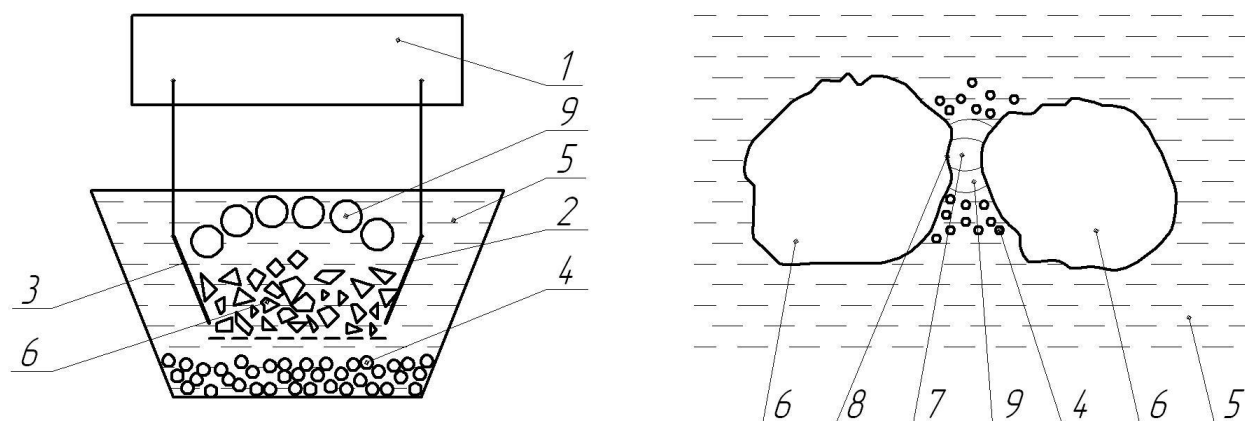


Рис. 1. Процесс ЭЭД

Импульсное напряжение генератора импульсов 1 прикладывается к электродам 2 и 3 и далее к пластинам твердого сплава 6 (в качестве электродов также служат пластины твердого сплава). При достижении напряжения определённой величины происходит электрический пробой рабочей жидкости 5, находящейся в межэлектродном пространстве с образованием канала разряда 7 [2].

Благодаря высокой концентрации тепловой энергии материал в точке разряда 8 плавится и испаряется, РЖ испаряется и окружает канал разряда газообразными продуктами распада 9 (газовым пузырьём). В результате развивающихся в канале разряда и газовом пузыре значительных динамических сил, капли расплавленного материала 4 выбрасываются за пределы зоны разряда в РЖ, окружающую электроды, и застывают в ней, образуя сферические или эллиптические частицы порошка твердого сплава [2].

На производительность процесса ЭЭД влияют следующие основные параметры установки: частота следования импульсов, напряжение на электродах и емкость разрядных конденсаторов [3].

Производительность процесса электроэрозионного диспергирования условно можно разделить на массовую и количественную. Масса порошка, полученная в единицу времени, называется массовой производительностью процесса. Она находится в прямой зависимости от средней массы частиц всего порошка, которая, в свою очередь, находится в зависимости со средним размером частиц порошка и их количеством [4].

Для исследования производительности процесса электроэрозионного диспергирования в реактор установки [5, 6] загружали отходы твердого сплава КНТ-16 ГОСТ 19052-80, рабочей средой являлся вода дистиллированная ГОСТ 6709-72.

Параметры процесса электроэрозионного диспергирования отходов твердого сплава КНТ-16 и массовая производительность представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры и массовая производительность процесса ЭЭД твердого сплава КНТ-16

| № | Частота, Гц | Емкость, мкФ | Напряжение, В | Массовая производительность, г/ч |
|---|-------------|--------------|---------------|----------------------------------|
| 1 | 100 | 25,5 | 100 | 1 |
| 2 | 100 | 25,5 | 150 | 2 |
| 3 | 100 | 25,5 | 200 | 6 |
| 4 | 100 | 45,5 | 200 | 6,4 |
| 5 | 100 | 65,5 | 200 | 8,4 |

Таким образом, в ходе проведения эксперимента было установлено, что максимальная массовая производительность порошка, полученного ЭЭД твердого сплава КНТ-16, при частоте следования импульсов 100 Гц достигается при максимальном напряжении на электродах, равном 200 В и максимальной емкости разрядных конденсаторов, равной 65.5 мкФ (рисунок 2).

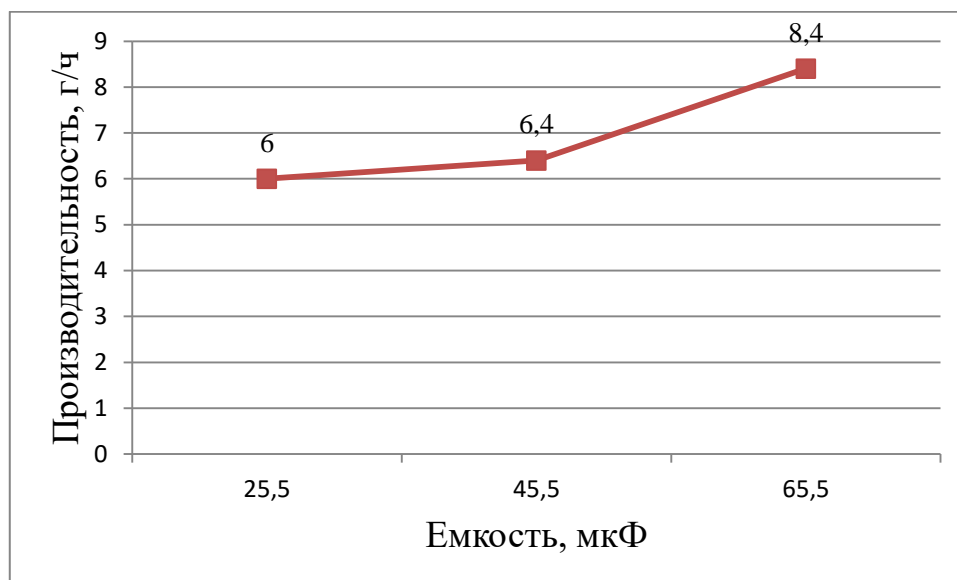


Рис. 2. Массовая производительность процесса ЭЭД твердого сплава КНТ-16 в воде дистиллированной при напряжении на электродах 200 В и частоте следования импульсов 100 Гц

При указанных параметрах процесса ЭЭД массовая производительность порошка составила 8,4 г/ч.

В результате проведенного исследования экспериментально установлено, что массовая производительность процесса электроэрозионного диспергирования твердого сплава КНТ-16 напрямую зависит от величин напряжения и емкости разрядных конденсаторов.

Литература

1. Агеев, Е.В. Применение порошка твердого сплава КНТ-16 полученного электроэрозионным диспергированием для восстановления и упрочнения деталей в машиностроении [Текст] / Е.В. Агеев, Б.Н. Сабельников // Инновационные технологии реновации в машиностроении: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Москва, 2019. – С. 292-296.
2. Агеева, Е.В. Твердые сплавы, полученные из электроэрозионных порошков: монография [Текст] / Е.В. Агеева, О.В. Кругляков, Н.М. Хорьякова, Е.В. Агеев; Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2015. 166 с.: ил. 40, табл. 24.

3. Агеев Е.В. Электроэрозионное диспергирование шарикоподшипниковой стали до микро- и нанодисперсий [Текст] / Е.В. Агеев, А.Ю. Алтухов, С.В. Хардинов, С.В. Пикалов // Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов: матер. XII Междунар. науч. конф. – Усть-Каменогорск, 2015. – С. 45–50.
4. Переверзев, А.С. Исследование влияния электрических параметров установки на производительность процесса электроэрозионного диспергирования отходов свинцовой бронзы в дистиллированной воде [Текст] / Е.В. Агеева, А.С. Осьминина, А.С. Переверзев // Известия ЮЗГУ. – 2018. – №1 – С. 6-14.
5. Агеев Е.В. Установка для получения нанодисперсных порошков из токопроводящих материалов. Патент РФ № 2449859. 10.05.2012.
6. Агеева Е.В. Установка для электроэрозионного диспергирования отходов никрома до микро- и нанодисперсий [Текст] / Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. Курск.– 2015. – С. 83 – 86.
7. Переверзев, А.С. Материальный баланс процесса электроэрозионного диспергирования отходов свинцовой бронзы в осветительном керосине [Текст] / А.С. Переверзев, А.С. Осьминина // Наука молодых - будущее России: сб. ст. 2-й Междунар. науч. конф. – Курск, 2017. – С. 125-128.
8. Переверзев А.С. Проведение рентгеноспектрального микроанализа порошка свинцовой бронзы, полученного электроэрозионным диспергированием в дистиллированной воде [Текст] / Е.В. Агеев, А.С. Переверзев // Прогрессивные материалы и технологии изготовления заготовок: Материалы Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых. – Рыбинск: РГАТУ имени П. А. Соловьева, 2018. – С. 31-34.
9. Переверзев, А.С. Исследование влияния электрических параметров установки на производительность процесса электроэрозионного диспергирования отходов свинцовой бронзы в дистиллированной воде [Текст] / Е.В. Агеева, А.С. Осьминина, А.С. Переверзев // Известия ЮЗГУ. – 2018. – №1 – С. 6-14.

УСТРАНЕНИЕ КОРОНЧАТОСТИ ПРИ ВЫТЯЖКЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КВАДРАТНЫХ ЗАГОТОВОК.

Самсонов Н. А.

Научный руководитель — д.т.н. проф. Ларин С.Н.

ТулГУ, каф. МПФ

E-mail: Samsonovn888@yandex.ru

В промышленности Тульской области широкое применение получила технология вытяжки тонкостенных стаканов из заготовок имеющих круглую форму. Изготовление габаритных осесимметричных стаканов используется в оборонно-промышленном комплексе при производстве высокоточного вооружения, комплектующие узлов агрегатов, патронов, гильз. Возможность изготовления деталей соответствующих нормам и стандартам, отвечающих ряду технических и технологических требований, предъявляемых к изделию – необходимое условие конкурентоспособности предприятий.

Основным технологическим процессом получения габаритных осесимметричных изделий является холодное выдавливание из круглых заготовок. Однако, при раскрое таких заготовок из ленты или полосы, значительно падает коэффициент использования металла, что ведет к ухудшению экономического эффекта.

В работе рассматриваются основные возможности замены стандартных заготовок на квадратные, для уменьшения потери металла при вырубке. Кроме этого возможность использования квадратных заготовок, поднимет высоту конечного полуфабриката, которая поможет дополнительно сохранять используемое сырье. Не смотря на очевидные преимущества, такая вытяжка не нашла широкого применения из-за сложности в самом процессе выдавливания. Исследования в данной теме использовались только в сочетании с изотропией свойств используемого металла. Однако анизотропия механических свойств способствует модернизации процесса вытяжки с более низким коэффициентом использования металла. Исследования показали, что при процессе вытяжки, максимальная высота заготовки по впадинам, была выше на 13 % в сравнении с круглой заготовкой. Экономия металла составила около 15 %.

В данный момент были проанализированы и предложены несколько конструкций инструмента позволяющего выполнить такую вытяжку. Основным отличием, от стандартных штампов, является профильная заходная часть матрицы. Такая форма, позволяет влиять на течение металла при вытяжке. Учитывая размещение заготовки на фигурной заходной части, а также анизотропные свойства исходного материала, возможно получить колпак большей высоты, при использовании меньшего количества металла. В программном комплексе QForm 3D были разработаны и рассчитаны варианты вытяжки квадратных заготовок на профильной матрице. Моделирование велось для двух вариантов. При первом варианте направление сторон заготовки совпадает с минимальным радиусом скругления матрицы. При втором варианте направление стороны заготовки совпадает с максимальным радиусом скругления матрицы. Для моделирования использовался алюминий (АМг6). Обработка экспериментальных данных позволила определить наличие жестких зон во фланце заготовок, динамику их развития, а также определить траектории движения ячеек при вытяжке.

Игнорирование исследования анизотропии и как следствие фестонообразования, неизбежно ведет к увеличению коэффициента использования металла на предприятиях. Вытяжка с использованием профильной матрицы и правильно расположенной квадратной заготовкой дает возможность экономии исходного сырья (до 15%).

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПЛАВЛЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ НИКЕЛЯ

Сафина Л.Р.¹, Баимова Ю.А.^{1,2}

¹Башкирский государственный университет, г. Уфа,

²ИПСМ РАН, г. Уфа.

E-mail: safli@mail.ru

В работе представлены результаты, полученные методом молекулярной динамики при исследовании особенностей плавления наночастиц никеля с использованием простого парного межатомного потенциала Морзе. Было исследовано плавление наночастиц Ni₃₄, Ni₃₈₂, Ni₁₁₉₂ и получены температуры плавления. Подтверждено, что потенциал Морзе позволяет изучать плавление наночастиц никеля, поскольку полученные результаты хорошо согласуются с известными из литературы. Показано, что температура плавления самого малого кластера Ni₃₄ составляет 1360 К, в то время как температуры плавления больших кластеров никеля близки к 2000 К, т.е. температуре плавления объемного образца.

Введение. Знание термодинамики металлических наночастиц имеет большое значение для углубления понимания свойств и применения металлических наночастиц в различных областях науки. В данной работе проведено моделирование методом молекулярной динамики для исследования особенностей плавления наночастиц никеля с целью дальнейшего изучения композитов графен-никель.

Методы. Численные эксперименты проводились в свободно распространяемом пакете молекулярно-динамического (МД) моделирования LAMMPS. С целью описания и исследования наноструктур методом МД необходимо задавать потенциалы межатомного взаимодействия для всех частиц. Одним из простых и при этом эффективных потенциалов межатомного взаимодействия является потенциал Морзе. Он широко применяется в моделировании различных материалов и соединений. Для описания взаимодействия атомов Ni-Ni были выбраны параметры, предложенные в работе [1]: $D_e = 0.4205$ eV, $\beta = 1.4199$ 1/Å и $R_e = 2.78$ Å. Данный потенциал достаточно хорошо описывает взаимодействие атомов металлов и его параметры для многих элементов известны. Модель с потенциалом Морзе позволяет получать реалистичные (наблюдаемые в эксперименте) равновесные формы однородных наночастиц. Раньше межатомный потенциал был успешно использован для исследования структурной устойчивости и энергии никелевых кластеров, Ni_n (n = 3-459); плавления и разрушения кластера Ni₄₂₉ [2, 3]. Следует отметить исследования, которые были посвящены взаимодействию различных металлических наночастиц для изучения кинетики взаимодействия и процесса плавления в работах [4, 5, 6, 7]. Разработанные в [1] параметры потенциала Морзе широко используются для исследования объемных образцов никеля, но должны быть тщательно проверены для изучения нанообъектов.

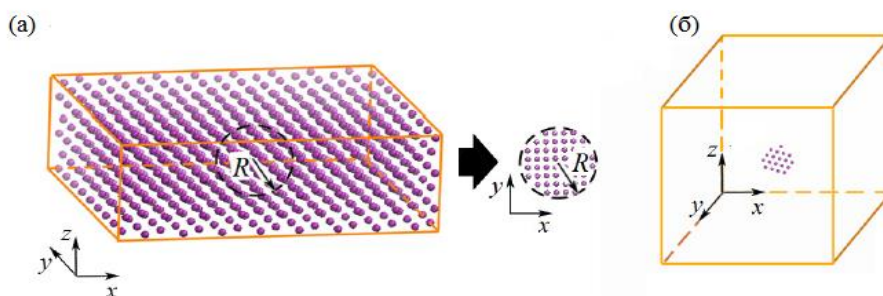


Рис.1. (а) Схема вырезания наночастицы из объемного кристалла Ni. (б) Ячейка моделирования.

На рис. 1 (а) показано, как получается наночастица Ni из объемного ГЦК-кристалла никеля. Из объемного кристалла Ni вырезается сфера радиуса R , так, чтобы получить наночастицу никеля нужного размера: $\varnothing 22$ Å (нанокластер Ni₁₁₉₂), $\varnothing 20$ Å (нанокластер Ni₃₈₂) и $\varnothing 6$ Å (нанокластер Ni₃₄).

Были выбраны периодические граничные условия, чтобы в рассматриваемых соседних ячейках периодичности, структуры не взаимодействовали друг с другом. Ячейка выбирается

размером, намного превосходящим размер самой наночастицы. Пример показан на рис. 1б.

Результаты. В данной работе было выявлено, что температура плавления мелких металлических наночастиц ниже, чем объемных материалов. В настоящей работе температура плавления Ni_{34} оказывается равной ~ 1360 К. Контролировать тепловое поведение наночастиц можно с помощью некоторых физических величин, таких как средняя потенциальная энергия атома, функция радиального распределения атомов и т.д. В качестве примера для Ni_{34} исследованы роли поверхностных атомов в процессе плавления и фрагментации кластера.

На рис. 2а показана калориметрическая кривая, представляющая собой график средней потенциальной энергии атомов как функции температуры. Так же представлено энергетическое состояние нанокластера при разных температурах, где каждый атом окрашен в соответствии с его потенциальной энергией. Средняя потенциальная энергия на атом монотонно возрастает с 1150 К до 1400 К, что может рассматриваться как область фазового перехода, где наночастица начинает переходить из твердой структуры в жидкое состояние. А при более высоких температурах возможно отсоединение атомов от поверхности нанокластера.

Температура плавления более крупных наночастиц (диаметром 20 и 22 Å) составила около 2000 К, что близко к температуре плавления объемного никеля. Полученные результаты хорошо согласуются с данными, представленными в литературе.

На рис. 2б для Ni_{34} показана функция радиального распределения для разных температур, которая отражает информацию о структуре наночастиц, использованную ранее [8, 9]. Для Ni_{34} , функция радиального распределения анализируется как дополнительное подтверждение расплавленного состояния.

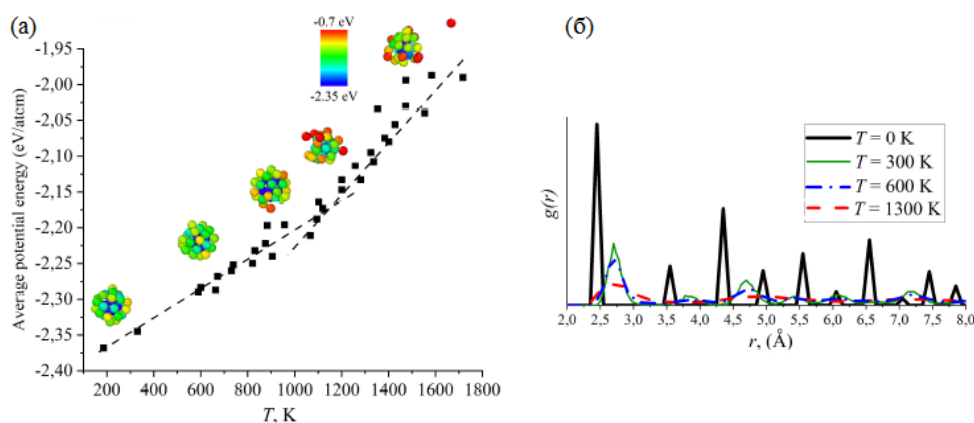


Рис. 2. (а) Средняя потенциальная энергия на атом в зависимости от температуры для Ni_{34} . Атомы наночастицы окрашены в соответствии с их потенциальной энергией. (б) Функция радиального распределения для температур 0 К, 300 К, 600 К и 1300 К для Ni_{34} .

Выводы. В результате моделирования показано, что при использовании параметров потенциала Морзе, разработанных в [1] температура плавления металлических наночастиц Ni зависит от их размера: чем объемнее металл, тем выше температура плавления, что соответствует уже известным из литературы результатам. Кроме того, полученные температуры плавления соответствуют известным из литературы. Данная работа позволила проверить применимость простого потенциала Морзе для изучения плавления наночастиц никеля. Работа будет иметь продолжение в виде исследования плавления наночастиц никеля внутри углеродной структуры, где взаимодействие атомов графена и никеля также будет описано с помощью потенциал Морзе.

Литература

1. Girifalco L. A., Weizer V. G. Application of the Morse potential function to cubic metals Physical Review, 1959, 114, 687-690.

2. Erkoc, S.; Gunes, B.; Gunes, P. Molecular-dynamics simulations of nickel clusters *International Journal of Modern Physics C*, 2000, 11(5), 1013-1024.
3. Gunes, B.; Erkoc, S. Melting and fragmentation of Ni nanopartiles: molecular-dynamics simulation *International Journal of Modern Physics C*, 2000, 11(8), 1567-1580.
4. Henz, B. J.; Hawa, T.; Zachariah, M. R. Molecular Dynamics Simulation of the Kinetic Reaction of Ni and Al Nanoparticles *Molecular Simulation*, 2009, 35(10).
5. Sharma, A.; Hickman, J.; Gazit, N.; Rabkin, E.; Mishin Y. Nickel nanoparticles set a new record of strength *Nature Communications*, 2018, 9, 4102.
6. Yousea, M.; Khoie, M.M. Molecular dynamics simulation of Ni/Cu-Ni nanoparticles sintering under various crystallographic, thermodynamic and multi-nanoparticles conditions. *Eur. Phys. J. D*, 2015, 69, 71.
7. Joshi, N.P.; Spearot, D.E.; Bhat D. Melting of Ni and Fe Nanoparticles: A Molecular Dynamics Study with Application to Carbon Nanotube Synthesis *Journal of Nanoscience and*
8. Mazzone, A. M. Molecular dynamics calculations of melting and fragmentation of Ar and Ag clusters *Phil. Mag. Lett.*, 1998, 78, 145.
9. Lewis, L. J.; Jensen, P.; Barrat, J. L. Melting, freezing, and coalescence of gold nanoclusters *Phys. Rev. B*, 1997, 56, 2248.

ОПТИМИЗАЦИЯ ЦЕПНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ШАРОВЫХ СЕГМЕНТОВ

Сафронов А.В.

Мытищинский филиал МГСУ (НИУ)

E-mail: shyrik98@inbox.ru

В работе решается задача о минимизации массы баков различной геометрической формы для хранения и перевозки жидких и сыпучих веществ. Перспективным направлением является применение новых видов конструкций из сферических сегментов. Показано, как такие конструкции вписываются в нормативы.

Введение. Цель работы заключается в разработке проекта перспективной лёгкой цистерны для хранения жидкостей и сыпучих материалов. Исследование актуально в связи с увеличением грузопотока жидкого углеводородного топлива. Другой областью применения полученных результатов является авиационная и космическая техника, требующая создания лёгких и прочных конструкций. Ещё одна область применения находится в создании силовых корпусов новых подводных аппаратов. Перевозка и хранение сыпучих веществ, таких как цемент, мука, зерно, песок и т.д., тоже требуют иметь лёгкие и прочные транспортные ёмкости.

Методы. Работа началась с выяснения оптимальных или рациональных форм открытых бассейнов, но очень скоро исследование стало междисциплинарным [1,2,3]. В настоящее время традиционной цистерной является цилиндрическая конструкция, потому что она наиболее технологична. Является ли такая конструкция оптимальной или рациональной по массе, особенно важной для транспортных средств? Для иллюстрации был исследован пример оптимальной по массе цилиндрической ёмкости. Пусть, например, требуется создать закрытую цилиндрическую ёмкость для перевозки жидкости или сыпучего материала объёмом 1000 м^3 . Объём цилиндра равен $V_y = \pi r^2 h = 1000 \text{ м}^3$. Высота цилиндра равна

$h = \frac{V_y}{\pi r^2}$. Подставляем выражение для высоты в формулу для площади полной поверхности цилиндра, включающей боковую поверхность и два круглых основания, получаем целевую

функцию для поиска её минимального значения $S_y(r) = 2\pi rh + 2\pi r^2 = \frac{2V_y}{r} + 2\pi r^2$.

Определяем производную полученной целевой функции $\frac{dS_y(r)}{dr} = \frac{-2V_y + 4\pi r^3}{r^2}$.

Применяем необходимое условие экстремума $\frac{dS_y(r)}{dr} = 0$. Получаем уравнение

$-2V_y + 4\pi r^3 = 0$. Из этого уравнения определяем радиус цистерны

$r = \sqrt[3]{\frac{V_y}{2\pi}} = \sqrt[3]{\frac{1000}{2\pi}} \approx 5,419 \text{ м}$. Найденное значение радиуса является точкой минимума,

потому что при переходе через неё производная функция $\frac{dS_y(r)}{dr}$ изменяет знак с минуса на

плюс. При таком радиусе площадь полной поверхности конструкции будет равна

$S_y = \frac{2V_y}{r} + 2\pi r^2 \approx 553,581 \text{ м}^2$. Высота цилиндра будет равна

$h = \frac{V_y}{\pi r^2} \approx \frac{1000}{\pi \cdot 5,419^2} \approx 10,840 \text{ м}$. Длина самой лёгкой цилиндрической цистерны

получилась равной диаметру конструкции $D = 2r = 2\sqrt[3]{\frac{V_y}{2\pi}} \approx 10,838 \text{ м}$. На практике

применение такой конструкции ограничено. Если для морского транспорта такое

соотношение размеров допустимо, то для автомобильного не может быть применено, потому что проезжая часть окажется перекрытой. Автомобильные цилиндрические цистерны имеют большое удлинение, поэтому далеки от самых лёгких конструкций. Противоречие между минимальной массой и нерациональными габаритными размерами цилиндрической цистерны можно устранить только переходом к другим формам конструкций, более сложным, менее технологичным, более дорогим в изготовлении, но зато окупающимся в перспективе. Сначала рассмотрим пример открытой ёмкости в виде сферического сегмента радиуса r высотой h . Объём сферического сегмента равен

$V_{cc} = \frac{3\pi r h^2 - \pi h^3}{3}$, а площадь поверхности $S_{cc} = 2\pi r h$. Рассмотрим отношение объёма

открытой ёмкости в виде сферического сегмента к площади её поверхности как функцию от высоты сферического сегмента $f(h) = \frac{V_{cc}}{S_{cc}} = \frac{3rh - h^2}{6r}$. Определяем производную

$\frac{df(h)}{dh} = \frac{3r - 2h}{6r}$. Применяем необходимое условие экстремума $\frac{df(h)}{dh} = 0$. Получаем

уравнение $3r - 2h = 0$. Из этого уравнения находим критическую точку $h = \frac{3r}{2}$. Это точка

локального максимума, так как при переходе через неё функция $f(h)$ изменяет свой знак с плюса на минус. Получилось, что максимальный объём сферического сегмента при минимальной его площади будет достигнут, если отсечь от сферы «шапочку» высотой, равной половине радиуса сферы. Сферические аквариумы для рыбок выполняют именно такой формы для максимизации объёма наливаемой в них воды. При этом объём

сферического сегмента равен $V_{cc} = \frac{\pi h^2(3r - h)}{3} = \frac{9\pi r^3}{8} \approx 3,534r^3$, а площадь его

поверхности равна $S_{cc} = 2\pi r h = 3\pi r^2 \approx 9,425r^2$. Полученных предварительных данных достаточно, чтобы исследовать новую конструкцию цистерны. Цистерна должна быть закрытой, поэтому достаточно соединить два сферических сегмента друг с другом по окружностям открытых частей. Получится закрытая ёмкость с удвоенным объёмом и с удвоенной площадью поверхности по сравнению с единичным сферическим сегментом, то

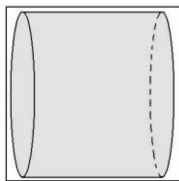
есть с объёмом $V = \frac{2\pi h^2(3r - h)}{3} \approx 7,068r^3$ и площадью поверхности

$S = 2 \cdot 2\pi r h \approx 18,850r^2$. Для сравнительного анализа новой конструкции цистерны с традиционной цилиндрической формой возвращаемся к конкретному модельному примеру с объёмом ёмкости $V = 1000 \text{ м}^3$. Тогда радиусы двух состыкованных сферических сегментов

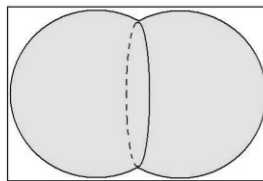
должны быть одинаковыми и равными $r \approx \sqrt[3]{\frac{V}{7,068}} \approx \sqrt[3]{\frac{1000}{7,068}} \approx 5,211 \text{ м}$. При этом

площадь поверхности цистерны, то есть масса конструкции, будет минимальной и равной $S \approx 511,863 \text{ м}^2$. Для иллюстрации соотношение габаритных размеров традиционной и новой конструкций представлено на рис.1.

Сравнительный анализ габаритов самых лёгких цистерн одинаковой ёмкости (приближённые размеры)



Оптимальная цилиндрическая цистерна с габаритами 10x10 м (удлинение 1)



Оптимальная цистерна из двух сферических сегментов с габаритами 10x15 м (удлинение 1,5)

Рис.1. Соотношение габаритных размеров традиционной и новой цистерн

После аналитического и численного изучения традиционной цилиндрической цистерны и новой конструкции в виде двух состыкованных сферических сегментов был проведён сравнительный анализ полученных результатов.

Выводы.

1. Объёмы обеих цистерн одинаковые. В расчётном примере они были приняты равными $V = 1000 \text{ м}^3$.
2. Площадь поверхности и масса конструкции в виде двух сферических сегментов для рассмотренного конкретного объёма оказалась меньше площади традиционной цилиндрической системы на 7,5%
3. Для этого объёма 1000 м^3 экономия листового материала составит $41,7 \text{ м}^2$.
4. При толщине стального листа 2 мм экономия объёма стали равна $0,083 \text{ м}^3$, то есть 647,4 кг при плотности стали 7800 кг/м^3 . Цистерна становится легче более чем на 600 кг и более чем на 7,5%.
5. Два состыкованных сферических сегмента позволяют создать рациональную конструкцию с увеличенным удлинением для улучшения транспортабельности.

Литература

1. Сафронов А.В. Экономическая роль технического задания в строительстве / Сборник трудов конференции "Строительство - формирование среды жизнедеятельности". XX Международная межвузовская научно-практическая конференция студентов, магистров, аспирантов и молодых учёных. - Москва, Московский государственный строительный университет, 26-28 апреля 2017 г. – С.753-755. – Электронный ресурс: <http://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/2017/StFJD2017.pdf>
2. Сафронов А.В. Экономическое обоснование технического задания в строительстве / XI Всероссийский форум студентов, аспирантов и молодых учёных «Наука и инновации в технических университетах». – Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, 23-27 октября 2017. – Секция «Экономика и управление». – Диплом «За лучший секционный доклад». – Электронный ресурс: <http://ysc.spbstu.ru/forum2017/>
3. Сафронов А.В. Экономическое обоснование технического задания в строительстве / Машиноведение и инновации. 29-я конференция молодых учёных и студентов (МИКМУС-2017). Труды конференции. - Москва, Институт Машиноведения им. А.А.Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления, 6-8 декабря 2017 г. - ISBN 978-5-44-65-1752-7. - С.242-244. – Электронный ресурс: http://mikmus.ru/opendocs/MIKMUS-2017/Pr_17_v_002.pdf

ШАРНИРНО-РЫЧАЖНЫЙ МЕХАНИЗМ КАК ТЕХНИКО-МЕДИЦИНСКАЯ ОСНОВА НОВОГО РЕФЛЕКТОРНОГО ШАГАЮЩЕГО ТРЕНАЖЁРА

Скворцова А.А.

МАИ (НИУ)

E-mail: saa2509@mail.ru

В работе показано, как известный лямбдаобразный механизм П.Л.Чебышева связан с медицинским направлением техники. Природная траектория движения стопы человека заложена в подкорку головного мозга. Правильное движение ноги на тренажёре позволяет активизировать двигательные центры мозга пациента.

Введение. Цель работы – вызвать безусловный рефлекс шагающего движения из подкорки головного мозга пациента с утраченными функциями опорно-двигательного аппарата с помощью специального тренажёра, который напугает человеку о природной траектории движения стопы. Мозг в процессе эволюции стал развиваться, обрастать корой. В коре головного мозга, которая расположена снаружи находятся высшие психические функции: речь, мышление, эмоции и т.д. Кора головного мозга формировалась постепенно. Постепенно в ней появлялось всё больше психических функций. Это как компьютер, который постепенно становился всё мощнее. Обратимся к книге Л.О.Баданяна «Невропатология» [1] и к атласу [2] и изучим подкорковую область мозга человека стрио-паллидум. Область стрио-паллидум является важной составной частью двигательной системы. По филогенетическому происхождению, то есть появлению на определённой ступени эволюционного развития, паллидум является более древним образованием, чем стриатум. Стрио-паллидум является составной частью двигательной системы. В двигательной системе человека есть два пути организации и передачи сигналов для выполнения движений. Во-первых, пирамидальный путь, который начинается в коре головного мозга. Кора – это сравнительно новое эволюционное образование с высшими физиологическими функциями. Её можно сравнить с мощным процессором компьютера. В двигательной зоне коры головного мозга формируется сигнал для выполнения человеком определённого движения. Это вершина пирамиды, её острière. Затем этот сигнал передаётся ниже по пирамиде в передающие пути, расширяясь к основанию пирамиды, затем попадает в мышцы, ещё более расширяясь, пока не достигнет основания пирамиды. Во-вторых, существует внепирамидальный путь передачи сигнала и организации движения человека. Этот путь осуществляется внепирамидальной, или экстрапирамидальной, системой, в которую входит стрио-паллидум. Пирамидальный и внепирамидальный пути двигательного сигнала не обособлены, а, напротив, связаны друг с другом. Как только двигательный сигнал сформировался в коре головного мозга и поступил на вершину пирамидального пути, тут же включается внепирамидальная система, подключается к пирамидальной системе, участвует в организации произвольных движений человека. Пирамидальная система обеспечивает рациональные, оптимальные движения, а внепирамидальная – произвольные. Внепирамидальная система – это множество тех движений, которые человек в принципе способен осуществить. Пирамидальная система – это выбор оптимальных движений из указанного множества. На ранних стадиях эволюции, когда понятия о человеке ещё не существовало, когда кора головного мозга не была развита, основным двигательным центром была только область стрио-паллидум. Стрио-паллидум обеспечивала диффузные, неорганизованные, множественные движения. Особенно явно это видно при передвижении косяков рыб, в прыжках лягушек. Развитие головного мозга и его коры подчинило себе стрио-паллидум. Кора стала главным двигательным центром мозга человека. Стрио-паллидум под корой стала только предварительно готовить движения, предлагать возможное их множество. Кора стала выбирать из этого множества быстрые, чёткие, вполне определённые, дифференцированные движения. Кора стала перераспределять команды множеству мышц, обеспечивая рациональный мышечный тонус. С математической точки зрения это очень сложная задача управления механизмом с очень большим числом степеней свободы. Перераспределение мышечного тонуса с целью экономии механической энергии – это основное назначение стрио-паллидарной системы,

взаимодействующей с пирамидальной организацией передачи сигналов. Постепенная отработка точных движений связана с длительной автоматизацией стрио-паллидарной системы, с её организацией под руководством коры головного мозга. В филогенетическом, то есть эволюционном, отношении, стриатум является более поздним образованием, чем паллидум. Примером служат хладнокровные рыбы. Мощные и точные броски требуют очень много энергии, являясь паллидарной формой управления движением. Паллидарная форма энергетически расточительна, но она хранит информацию о всевозможных движениях организма, пусть даже не оптимальных. Позднее появились теплокровные птицы, у которых более выражен стриатум, потому что потребовалось экономить энергию, потому что большая часть энергии стала расходоваться на обогрев. Движения птиц стали более расчётливыми и точными. Следовательно, стриатум тормозит паллидум. Стриатум ограничивает возможности паллидума более точным расчётом и оптимальным управлением движения, чёткой целью, экономией энергии. Наблюдается общая закономерность эволюционного процесса. Более молодые эволюционные образования тормозят и подчиняют себе более древние системы. Движение новорожденного носит паллидарный характер: броски, рывки, излишество. Но очень быстро они становятся более стриональными, расчётливыми. Наконец, эволюционно молодая кора головного мозга взяла под контроль всю стрио-паллидарную систему, организовав пирамидальный путь передачи двигательных сигналов. Такой контроль обусловил связи стрио-паллидарной системы с корой головного мозга, с мышцами, со спинным мозгом и зрительным бугром. Кора головного мозга обнаружила, что у теплокровных организмов КПД маленький, механической энергии мало, её надо экономить. Поэтому в коре появился двигательный центр для оптимизации движения. Человек не может себе позволить так транжирить механическую энергию. Кора головного мозга с развившимся в ней двигательным центром оптимизации движения дополнила, но ни в коем случае не исключила, подкорковые безусловные двигательные рефлексы. С нейрофизиологической точки зрения важен факт существования диффузных, неорганизованных движений в паллидуме и более организованных движений в стриатуме. Техническая задача заключается в извлечении стрио-паллидарных движений из подкорки головного мозга, запоминание их корой, отработка и восстановление полноценной функции движения. Для этого организму надо напомнить то, что было в него заложено миллионы лет назад.

Методы. Закономерный вопрос. Если у человека нарушен опорно-двигательный аппарат, то не связано ли это с корой? Но если это связано с корой мозга, то как восстановить высшую двигательную функцию в коре? Кора может себя восстанавливать, она умная, мыслит, развивается, подстраивается, человек - устойчивая система. Как восстановить движение человека в коре мозга? Очевидный ответ - вызвать безусловный рефлекс из подкорки и записать его в кору. Мозг сам его запишет, запомнит, как ученик запоминает уроки. Схема такого вызова безусловного рефлекса с помощью нового шагающего тренажёра показана на рис.1.



Рис.1. Схема технико-медицинского воздействия тренажёра

В подкорке есть природная траектория стопы, потому что она появилась очень рано, раньше, чем человек встал на две ноги. Это первичный безусловный рефлекс. Надо создать устройство, которое поможет человеку вспомнить эту природную траекторию с историей 50000-100000 лет, возможно больше. Аналоги предлагаемого тренажёра созданы, существуют, работают, но эти аналоги служат только для разогрева мышц и постепенной

ликвидации их атрофии. В устаревших аналогах нога пациента движется по дуге окружности. Ни один человек, ни одно животное так не ходит, не передвигается. На земле стопа человека неподвижна, а если систему координат связать с человеком, то движется по прямолинейному отрезку назад, потому что человек шагает вперёд. Затем, оторвавшись от поверхности земли, нога человека описывает дугу вперёд, устанавливается опять на поверхность земли и процесс повторяется. Техническая задача реализации природной траектории движения стопы человека решена на новом рефлекторном шагающем тренажёре для реализации отмеченной ранее нейрофизиологической основы восстановления временно утраченных функций опорно-двигательного аппарата [3,4,5,6]. Работа поддержана грантом программы УМНИК.

Литература

1. Бадалян Л.О. Невропатология. – М.: Просвещение, 1982.
2. Астапов В.М., Микадзе Ю.В. Атлас нервной системы человека. Строения и нарушения. – Изд.8-е, пер. и доп. – М.: PerSe, 2011.
3. Скворцова А.А. Рефлекторный реабилитационный шагающий тренажёр / I Международная школа конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Биомедицина, материалы и технологии XXI века», 25-28 ноября 2015. – Казанский (Приволжский) федеральный университет. – Казань: Изд. К(П)ФУ, 2015. - http://media.wix.com/ugd/14a693_45f91b4f1bb94b6c8f2ad843beeb8ded.pdf
4. Скворцова А.А. Шарнирный механизм для шагающего рефлекторного тренажёра / XXVII Международная инновационно ориентированная конференция молодых учёных и студентов МИКМУС-2015. – Труды конференции. – ИМАШ РАН, 2-4.12.2015. - С.286-289. – Электронный ресурс: http://mikmus.ru/opensdocs/Archive_materials/iicyss_2015_f_p.pdf
5. Скворцова А.А. Новый шагающий тренажёр / II Международная школа конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Биомедицина, материалы и технологии XXI века», 20-23 сентября 2016. – Казанский (Приволжский) федеральный университет. – Казань: Изд. К(П)ФУ, 2016.
6. Скворцова А.А. Оценка плавности хода шагающего механизма / Наука и инновации в технических университетах: Материалы XI Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2017.– 121 с. – С.23-25.

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ЗА СЧЕТ КОМБИНИРОВАННОГО УПРОЧНЕНИЯ

Федичев Д.К.
Московский Политех
E-mail: civiri@ya.ru

На сегодняшний день актуальной является проблема повышения эксплуатационной надежности и ресурса агрегатов, узлов и деталей авиационных двигателей, которые работают в условиях циклических нагрузок и повышенных температур. Основными требованиями к деталям являются надежность и долговечность работы. К таким деталям, испытывающим при эксплуатации переменные нагрузки и воздействие высоких температур, можно отнести лопатки и диски компрессора.

Существует различные способы упрочнения лопаток компрессора, которые позволяют решить ту или иную задачу. К таким способам относят:

- нанесение покрытия (ионно-плазменная обработка);
- отделочно-упрочняющая обработка;
- электроплазменные процессы нанесения покрытия;
- термопластическое упрочнение;
- поверхностно-пластическое деформирование.

При работе двигателя лопатки подвергаются повреждениям в виде образования усталостных трещин, забоин от попадания посторонних предметов и воздействия твердых пылевых частиц, а также коррозионно-эрозионному изнашиванию. По этой причине эффективными являются методы упрочнения, которые обеспечивают создание в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений.

Проведенный анализ зарубежного опыта упрочнения деталей авиационных двигателей показывает, что к перспективным методам упрочнения относятся: лазерный метод, метод выглаживания поверхности микрошариком, опирающимся на струю жидкости, и кавитационный метод.

Однако перечисленные методы формируют сжимающие напряжения на глубине ($0,5 \div 0,7$ мм) в поверхностном слое упрочняемой детали, что недостаточно для увеличения эксплуатационных характеристик.

Более широкий диапазон глубин распространения остаточных напряжений обеспечивает такой метод обработки поверхностно-пластическим деформированием, как ультразвуковая обработка. Однако, стоит отметить, что к рассматриваемым деталям предъявляются весьма жесткие требования по точности геометрии и по шероховатости. В связи с чем, разработка технологии обработки ультразвуковым методом подразумевает поиск компромисса в достижении максимальных эксплуатационных характеристик при выполнении технических требований, предъявленных к деталям.

В связи с выше сказанным, можно отметить, что перспективными способами упрочнения деталей являются тонкопленочные покрытия. Такие покрытия повышают твердость и износостойкость и могут позитивно влиять на эксплуатационные характеристики деталей. При нанесении диффузионного дискретного покрытия происходят физические и химические процессы. В первую очередь происходит образование диоксида титана TiO_2 , затем под слоем рутила образуется слой монооксида TiO .

Совместное использование методов ультразвуковой поверхностной упрочняющей обработки и дискретного покрытия в различных комбинациях может обеспечить дополнительный эффект в увеличении эксплуатационных характеристик рассматриваемых деталей.

Литература

1. Чекалова Е.А Исследование износостойких покрытий на титановом сплаве ВТ3-1/Е. А. Чекалова // «Материаловедение» – 2017. – № 9. – С. 3 – 6.
2. Чекалова Е. А. Повышение долговечности режущего инструмента и тяжело нагруженных деталей методом нанесения диффузионного сетчатого покрытия: монография. – М.: Изд-во Университет машиностроения, 2014. – 127 п. с.
3. Чекалова Е. А., П. Д. Чекалов. Повышение работоспособности твердосплавного инструмента путем применения активированного воздуха. Журнал известия МГТУ «МАМИ». – 2013. – №1 (15) т.2. – С. 113–118.

АНАЛИЗ СВЯЗЕЙ ПАРАМЕТРОВ МОНИТОРИНГА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

Снегирев И.В., Логинов Ю.Н.
Уральский федеральный университет
E-mail: igor_snegirev@mail.ru

Приведены диаграммы нагружения стана холодной прокатки. Выявлены колебательные процессы усилия и момента прокатки. Сделано предположение о постоянстве параметра плеча приложения равнодействующей усилия прокатки.

Введение. Современные прокатные станы снабжаются системами мониторинга, что позволяет анализировать параметры прокатки и делать выводы о наличии связей в системе показателей [1, 2]. В настоящее время связи между параметрами термо-деформационной обработки и свойствами позволяет установить такая система измерений как GLEEBLE [3,4]. Ряд исследований позволяет предположить, что сам прокатный стан может выполнять некоторые функции системы GLEEBLE. Такие попытки сделаны, например, при анализе работы стана горячей реверсивной прокатки при обработке слябов из алюминиевых сплавов [5]. Наличие сведений об энергосиловых параметрах процесса прокатки [6] позволяет сделать заключение о прочностных свойствах металла.

В исследовании подвергли анализу диаграммы записи энергосиловых параметров стана для холодной листовой прокатки фирмы Даниели, установленного на одном из заводов России. Диаметр рабочих валков стана равен 500 мм. Выбран второй проход прокатки при изменении толщины от 5,20 до 3,70 мм. Относительное обжатие здесь составляет 29%, степень деформации равна 0,34. На рис. 1 отображен график изменения усилия прокатки сплава АМг2 по длине прокатываемого рулона.

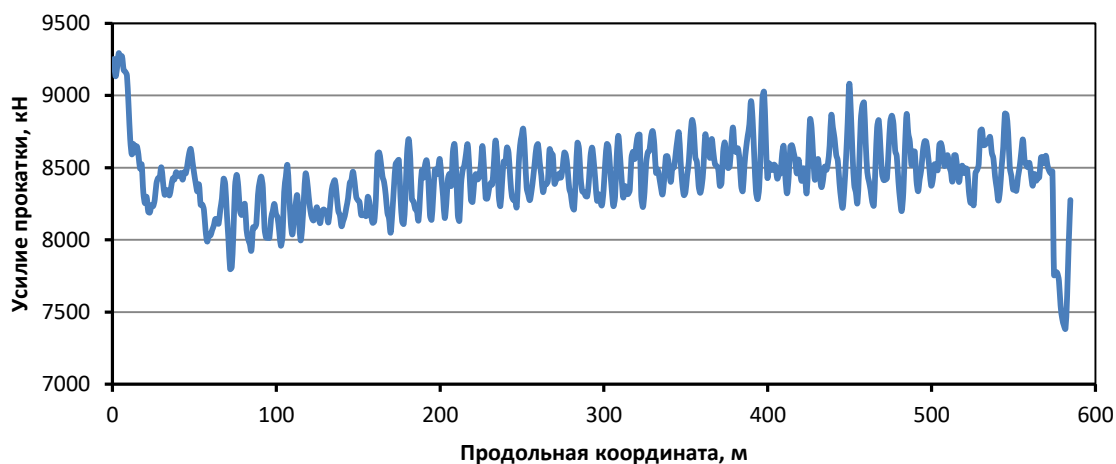


Рис.1. График изменения усилия прокатки сплава АМг2 по длине рулона

Колебания усилия связаны с подстройкой системы управления под колебания скорости при разгоне и торможении, входной толщины, свойств металла, управления натяжением, планшетностью и т.д.

Аналогичный график отражает изменение момента (рис.2). Внешний вид графика не во всем соответствует предыдущему, чего можно было бы ожидать. Из теории плоской прокатки известно, что момент и усилия прокатки должны изменяться пропорционально друг другу. Действительно, в простейшем случае, если не учитывать влияние натяжения и упругого сплющивания валков и полосы, то момент прокатки равен

$$M_{\pi} = 2 * P * \Psi * l,$$

где P , Ψ , l –соответственно усилие, коэффициент плеча приложения равнодействующей и

длина очага деформации.



Рис.2. График изменения крутящего момента по длине рулона

Отсюда

$$\Psi = M_{\Pi} / (2 * P * l).$$

Располагая данными по измеренным величинам момента и усилия, возможно нахождение коэффициента плеча приложения равнодействующей. Поскольку информация о параметрах прокатки хранится в электронных таблицах, возможно выполнить соответствующие расчеты. Действительно, в данном случае длина очага деформации равна $l = ((5,2 - 3,7) * 500 / 2)^{0,5} = 19,4$ мм. Поскольку измеряется момент на двигателе $M_{д}$, то придется учесть передаточное отношение редуктора i : $M_{\Pi} = M_{д} * i$.

В результате

$$\Psi = M_{\Pi} * i / (2 * P * l).$$

Результаты расчета по последней формуле показаны на рис.3.

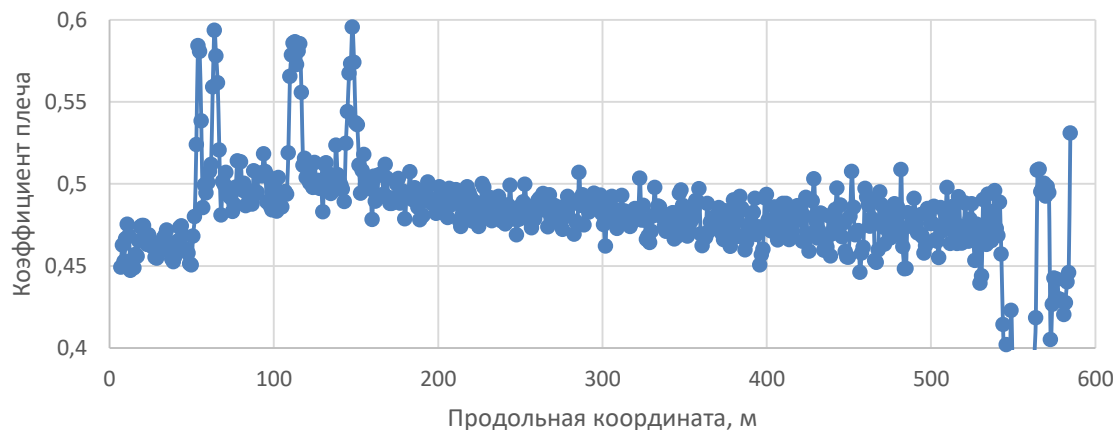


Рис.3. График изменения коэффициента плеча по длине рулона

Здесь видно, что коэффициент плеча может изменяться в пределах 0,45...0,60, что не противоречит теории плоской прокатки.

Однако имеется несколько тенденций, которые придется учесть при последующем анализе. На заправочной скорости при прокатке первых 50 м коэффициент плеча уменьшается до 0,45. В ходе прокатки коэффициент плеча имеет тенденцию к уменьшению.

Литература

1. Скрипаленко М.М., Ашихмин Д.А., Скрипаленко М.Н., Жигулев Г.П. Техническая диагностика и диагностическое моделирование механизмов главной линии прокатного стана *Металлург*. 2010. № 11. С. 48-53.
2. Qing-Long Wang, Jie Sun, XuLi, Yuan-Ming Liu, Peng-Fei Wang, Dian-Hua Zhang. Numerical and experimental analysis of strip cross-directional control and flatness prediction for UCM cold rolling mill. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018. V. 34. P. 637–649.
3. Чурюмов А.Ю., Базлов А.И., Царьков А.А., Михайловская А.В. Исследование структуры и свойств деформируемого алюминиевого сплава системы Al-Mg-Mn с использованием комплекса физического моделирования термомеханических процессов GLEEBLE 3800. *Металлург*. 2012. № 8. С. 76-80.
4. Хомутов М.Г., Чеверикин В.В., Коротичкий А.В. Оптимизация режимов термомеханической обработки высокопрочного алюминиевого сплава 019705. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2014. № 1 (703). С. 19-21.
5. Логинов Ю.Н., Головнин М.А. Методика определения параметров скоростного упрочнения алюминиевого сплава при горячей прокатке. *Металлы*. 2017. № 2. С. 33-38.
6. Логинов Ю.Н. Анализ энергозатрат при горячей прокатке листовых полуфабрикатов из алюминия. *Производство проката*. 2005. № 4. С. 19-24.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ИЗОТРОПНОГО ПОЛИКРИСТАЛЛА НА ОСНОВЕ АНИЗОТРОПНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГПУ РЕШЕТКИ

Соколов А.С., Трусов П.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

E-mail: aleks1997.1997@yandex.ru

Работа посвящена разработке упруговязкопластической модели поликристалла. Рассматривается анизотропный материал и эквивалентные ему изотропные, методы перехода от анизотропного к изотропному телу. Проведен ряд численных экспериментов для различных тензоров П. Представлены результаты и выводы.

Введение. При рассмотрении задач механики деформируемого твердого тела, теории пластичности и других, упругие определяющие соотношения для кристаллитов принимались изотропными, что является ошибкой, так как монокристалл, по своей природе обладают анизотропными свойствами. Применение изотропных соотношений облегчает решение поставленной задачи и формулирует ограничения для неё.

Методы. В рамках работы предлагается совершить переход от анизотропного кристаллита к изотропной модели поликристалла. Для перехода от анизотропного тела к изотропному выделяют три метода. Метод Фойгта [2]. Подход, основывающийся на условии однородности деформации материала. Применение этого метода позволяет определить упругие модули изотропного материала, такие как модуль всестороннего сжатия и коэффициент Ламе. Зная эти две константы можно найти остальные и построить матрицу компонент тензора упругих характеристик.

$$\begin{cases} \lambda = \frac{1}{15}(2c_{ii} - c_{ij}), \\ \mu = \frac{1}{30}(3c_{ij} - c_{ii}). \end{cases}$$

Где c_{ii} , c_{ij} – компоненты тензора упругих характеристик монокристалла для ГПУ решетки. Метод Рейсса [3]. Подход, основывающийся на условии однородности напряжения материала. Отличие этих двух методов в следующем, для расчета по Фойгту применяются компоненты тензора упругих характеристик, для расчета упругих модулей по Рейсса используются компоненты тензора упругой податливости.

$$\begin{cases} \frac{1}{K} = \frac{1}{15}(2s_{ij} + s_{ii}), \\ \frac{1}{\mu} = \frac{1}{15}(6s_{ij} - 2s_{ii}). \end{cases}$$

Где s_{ii} , s_{ij} – компоненты тензора упругой податливости монокристалла для ГПУ решетки. Метод Хилла или Фойгта–Рейсса–Хилла [5]. Расчет упругих модулей по Хиллу производится как средние арифметическое для упругих модулей по Фойгту и Рейссу.

$$\begin{cases} \lambda = \frac{1}{2}(\lambda_V + \lambda_R), \\ \mu = \frac{1}{2}(\mu_V + \mu_R). \end{cases}$$

Где λ_V , λ_R – коэффициенты Ламе, найденные по Фойгту и Рейссу, μ_V , μ_R – модули сдвига, найденные по Фойгту и Рейссу.

Модель и результаты. Расчеты по каждому из методов представлены в таблице 1. Упругие модули для материала брались из [1].

| Титан | | | |
|--------|------------|-----------|-----------|
| | K | μ | λ |
| Фойгта | 107.06 ГПа | 44.00 ГПа | 78.02 ГПа |
| Рейсс | 123.54 ГПа | 38.23 ГПа | 98.31 ГПа |
| Хилл | 115.3 ГПа | 41.11 ГПа | 88.16 ГПа |

Для решения исходной задачи использовалась двухуровневая математическая постановка, представленная в статье [4]. Результаты расчет представлены на рис.1.

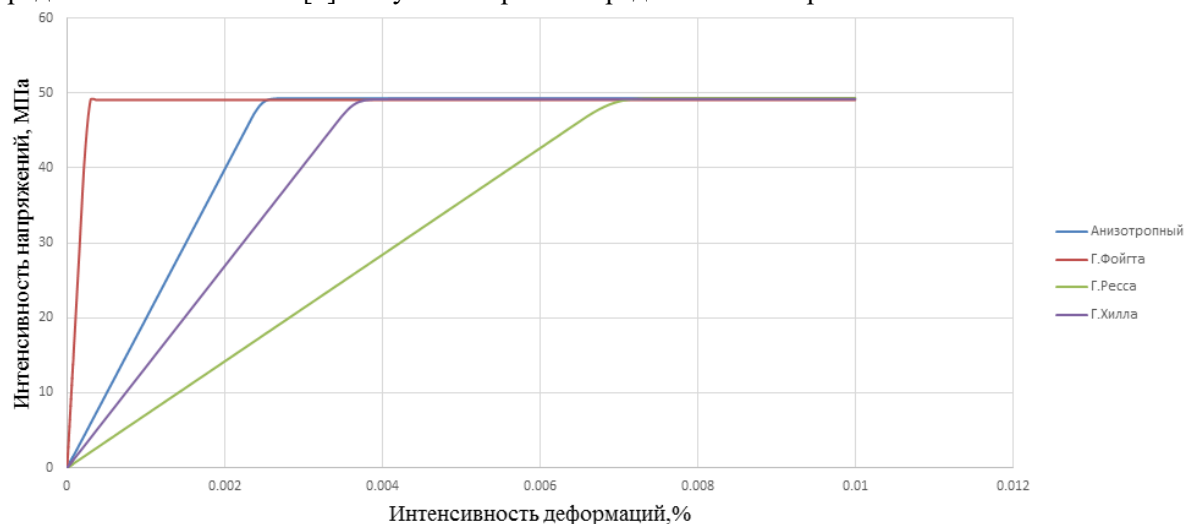


Рис.1. НДС для кристаллита и модельного тела

В работе были построены изотропные материалы по трём методам и проведено сравнение с анизотропным. Проведен численный эксперимент в виде нагружения на простой сдвиг. Из результатов следует, что материал по методу Фойгта становится верхней границей, по методу Рейсса нижней границей, а Хилл находится наиболее близко к анизотропному. Строилась диаграмма НДС с отрисовкой интенсивности напряжений от интенсивности деформации.

Литература

1. Мацюк К.В., Трусов П. В. Модель для описания упруговязкопластического деформирования ГПУ-кристаллов: несимметричные меры напряженно-деформированного состояния, законы упрочнения // Вестник ПНИПУ. – 2013. – Механика, №4. – С. 75-105.
2. Ньонхем Р.Э. Свойства материалов. Анизотропия, симметрия, структура. М.: Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, Ин-т комп. исслед., 2007. 652 с.
3. Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций / Пер. с англ. под ред. Э.М. Надгорного, Ю.А. Осипьяна – М.: Атомиздат, 1972. 600 с.
4. Трусов П. В., Швейкин А. И., Янц А. Ю. О разложении движения, независимых от выбора система отсчета производных и определяющих соотношениях при больших градиентах перемещений: взгляд с позиции многоуровневого моделирования // Физическая мезомеханика. – 2016. – №2. – С.47–65.
5. Шермергор Т. Д., Теория упругости микронеоднородных тел. – М: Наука, 1977. 399 с.

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ СЛОЖНОКОНТУРНЫХ ПОКОВОК

Соломонова А.К., Тищук Л.И., Соломонов К.Н.

ООО "НетКрекер"

E-mail: agata-solomon@yandex.ru

Рассмотрены некоторые аспекты формообразования сложноконтурных поковок с ребрами жесткости. Предложена «псевдонормальная» кинематическая схема течения металла.

При производстве сложноконтурных поковок с ребрами жесткости, используемых в авиационной и ракетно-космической технике, важной и актуальной задачей является предотвращение образования дефектов макроструктуры и разрушения материала. Как правило, такие поковки получают из плоских заготовок в процессахковки и объемной штамповки.

Моделирование формообразования металла в указанных технологических процессах позволяет избежать дорогостоящих лабораторных и промышленных экспериментов, а также проб и ошибок при промышленном производстве сложноконтурных поковок.

Значительную роль при моделировании пластического формоизменения плоских заготовок играет выбор кинематической схемы течения металла, которая определяет картину течения металла по полотну заготовки.

В качестве одного из способов решения задачи моделирования картины течения металла по плоскости контакта в процессахковки и объемной штамповки разработана так называемая «эквилибриальная теория» [1], основанная на трех известных принципах: наименьшего сопротивления, кратчайшей нормали и наименьшего периметра.

Разработанная теория пригодна для моделирования формообразования поковок, имеющих ярко выраженное полотно (т.е. плоскостные участки). Несмотря на кажущуюся ограниченность области применения «экви-теории», известно, что детали с признаком «плоскостности» составляют обширный класс изделий, используемых, в частности, в ракетно- и самолетостроении, да и вообще транспортном машиностроении.

В разное время проводились теоретические и экспериментальные исследования различных схем деформирования. В частности, Головиным А.Ф. была предложена так называемая «нормальная» схема, основанная на принципе кратчайшей нормали. При такой схеме течения металла линии тока направлены по нормали к контуру заготовки. В соответствии с ней прямоугольная пластина в ходе осадки должна превращаться в многоугольник. Однако в действительности прямоугольник после деформации приобретает форму эллипса.

В соответствии с «радиальной» схемой, предложенной Тарновским И.Я., движение частиц металла происходит вдоль радиусов некоторой окружности, под углом к контуру заготовки. Радиальная схема предполагает, что при свободной осадке прямоугольного параллелепипеда его поперечное сечение остается подобным самому себе, т.е. прямоугольник увеличивается в размерах, но не меняет своей формы.

Указанные схемы противоречивы и нуждаются в доработке, т.к. не объясняют так называемые «эллипсность» и «ушки», которые наблюдаются в реальных процессах. К тому же эти схемы объясняют формоизменение металла только в некоторых предельных случаях, нормальная – при максимальном трении, а радиальная – при полном его отсутствии, что на практике невозможно.

Анализируя результаты виртуальных [2] и лабораторных экспериментов и используя накопленные данные, относящиеся к реологическим особенностям материалов, а также опыт исследования уже существующих кинематических схем течения металла и зависимость их от различных факторов, можно предположить, что промежуточная кинематическая схема содержит элементы как нормальной, так и радиальной схем течения металла [3].

Исходя из сказанного логично предположить, что в процессах пластической деформации, при условиях трения близких к реальным, течение металла подчиняется некоторой «псевдонормальной» кинематической схеме течения металла [4], в соответствии с которой в

начальный момент деформирования движение частиц металла происходит вдоль линий тока перпендикулярно к контуру заготовки, и на последующих этапах деформирования линии тока направлены перпендикулярно, но уже не к реальному, а к условному контуру.

Литература

1. Соломонов К.Н., Федоринин Н.И., Тишук Л.И. Моделирование технологических методик пластического деформирования // Изв. Самарского НЦ РАН, 2017, № 1, с. 517-519.
2. Соломонов К.Н., Свирин В.В. Анализ кинематических схем течения металла с помощью виртуального эксперимента // Технология легких сплавов, 2010, № 3, с. 58-64.
3. Костарев И.В., Соломонов К.Н. Обоснование введения радиальной схемы течения металла в процессах штамповки тонкостенных ребристых деталей из алюминиевых сплавов // Изв. вузов. Машиностроение, 2000, № 3, с. 62-65.
4. Тишук Л.И., Соломонов К.Н., Мазур И.П. и др. Исследование картины течения металла при осадке // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2017, № 3, с. 37-44.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЖЕСТКОСТИ ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА НА ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

Son JINWOO

Научный руководитель — профессор, д.т.н. Бойцов. А.Г.
МАИ,

E-mail: entropy.jin@gmail.com

Для формообразования пера лопаток компрессоров авиационных двигателей изготавливаемых из титановых сплавов широко используются технологии фрезерования, в том числе высокоскоростного, которое позволяет увеличить производительность, и точность, уменьшить шероховатость обработанной поверхности.

Лопатки компрессора являются маложесткими деталями, что определяет необходимость их многоэтапной обработки, причем жесткость лопаток переменна как по ее длине, так и в сечениях (спинка, корыто, входная и выходная кромки). В процессе фрезерования постоянно изменяются силы резания, что приводит к возникновению вибраций, деформаций и прогибов. По этой причине для обеспечения точности формообразования целесообразно программное изменение режимов обработки (в первую очередь величины подачи).

Для реализации программного изменения режимов необходимы сведения о распределении жесткости лопатки по поверхности пера. Для решения этой задачи разработана модель позволяющая рассчитать распределение жесткости. Расчет выполнялся по твердотельной модели лопатки методом конечных элементов. Для оценки адекватности разработанной модели были выполнены измерения жесткости лопатки в нескольких сечениях приложением статической нагрузки и фиксацией вызванных этим деформаций. При этом базирование и закрепление лопатки соответствовало схеме используемой при реальной обработке (базирование по хвостовику и центровочному отверстию в технологической бобышке). В выбранных точках динамометром создавалась постоянная нормальная к поверхности сила, а измерительной системой осуществлялось измерение деформации в данной точке. Установлено соответствие результатов расчетов с экспериментальными данными с погрешностью не превышающей 10%.

В работе рассмотрен также опыт применения технологий высокоскоростного фрезерования лопаток компрессора, базовые схемы обработки, особенности обработки бандажных полок, входных и выходных кромок. Проанализировано инструментальное обеспечение обработки, конструктивные особенности инструмента применяемого для высокоскоростного фрезерования, ключевые проблемы, связанные с выбором схем обработки и назначением технологических режимов.

Рассмотрены вопросы оптимизации технологических режимов высокоскоростного фрезерования на основе расчета жесткости конструкции лопатки на различных этапах ее обработки. Для определения закономерностей изменения параметром режима резания предложен расчет допустимой силы резания не вызывающей выход размера за установленные допуски. Последняя, определяется жесткостью в месте воздействия инструмента, скоростью резания, глубиной резания, профилем режущей части фрезы, геометрией режущих кромок и величиной подачи.

Расчет допустимой силы резания выполнялся по известным зависимостям с варьирование величины подачи и изменением скорости резания связанным с различным угловым положением фрезы со сферической рабочей части при обработке отдельных элементов пера лопатки.

Разработанная модель может оказаться полезной для оптимизации процесса фрезерования маложестких лопаток в направлениях обеспечения точности и технологической надежности обработки.

КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА О СКОЛЬЖЕНИИ ИНДЕНТОРА ПО ВЯЗКОУПРУГОМУ ПОЛУПРОСТРАНСТВУ, ПОКРЫТОМУ УПРУГИМ СЛОЕМ

Степанов Ф.И., Яковенко А.А.

ИПМех РАН

E-mail: stepanov_ipm@mail.ru

Работа посвящена теоретическому моделированию скольжения индентора по вязкоупругому полупространству, покрытому слоем упругого материала. Предложенный метод решения контактной задачи позволил провести анализ распределения контактного давления, деформационной составляющей силы трения, а также внутренних напряжений в зависимости от податливости слоя и других параметров задачи.

Рассматривается пространственная контактная задача о скольжении жесткого индентора гладкой формы по упругому слою, сцепленному с вязкоупругим полупространством. Процесс скольжения является квазистатическим. Индентор нагружен вертикальной силой, а также горизонтальной силой, уравнивающей силу сопротивления скольжению. Механические свойства вязкоупругого полупространства описываются интегральным оператором Вольтерра с экспоненциальным ядром ползучести и спектром времен релаксации и последействия. Свойства упругого слоя описываются моделью Винклера, характеризуемой вертикальной податливостью. Касательные напряжения в области контакта отсутствуют. Требуется найти неизвестную площадку контакта, распределение контактного давления и внедрение индентора. Алгоритм решения контактной задачи основывается на методе граничных элементов [1,2] а также задачи о скольжении распределенной нагрузки по границе вязкоупругого полупространства [3]. Внутри прямоугольной области, заведомо содержащей в себе область контакта, давление аппроксимируется кусочно-постоянной функцией. На основании граничных условий и условия равновесия составляется система линейных алгебраических уравнений. Указанная СЛАУ решается в ходе итерационной процедуры, после каждого шага которой ранг СЛАУ сокращается за счет элементов с отрицательными давлениями. В результате определяется площадка контакта, распределение контактного давления и внедрение индентора в полупространство. Численные результаты были получены для безразмерных параметров и позволили провести анализ зависимости площадки контакта и контактного давления от податливости слоя. Также была исследована зависимость силы сопротивления скольжению, возникающая в результате неравномерного распределения контактного давления относительно оси симметрии индентора (деформационная составляющая силы трения) от податливости слоя при различных скоростях скольжения. На основании соотношений, полученных при решении задачи Буссинеска, а также численных результатов решения контактной задачи, было исследовано напряженное состояние вязкоупругого полупространства. Получены распределения растягивающих-сжимающих, а также максимальных касательных напряжений на поверхности и в глубине полупространства. Определено влияние податливости слоя на расположение точек с максимальными значениями напряжений, а также величину максимальных напряжений. Данные результаты могут быть использованы для моделирования износа при трении.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-31-00441

Литература

1. Александров В. М., Горячева И. Г., Торская Е. В. Пространственная задача о движении гладкого штампа по вязкоупругому полупространству // Докл. РАН. 2010. Т. 430. №. 4. С. 490–493
2. Горячева И. Г., Степанов Ф. И., Торская Е. В. Скольжение гладкого индентора при наличии трения по вязкоупругому полупространству // ПММ. 2015. Т. 79. Вып 6. С.853–863.
3. Александров В.М., Горячева И.Г. Движение с постоянной скоростью распределенной нагрузки по вязкоупругому полупространству // Матер. 5-й Росс. конф. с междунар. Участием “Смешанные задачи механики деформируемого тела”. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2005. С.23–25.

К ВОПРОСУ О ТОПОЛОГИИ РАЗРУШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Слугина Д.И.

Научный руководитель — профессор, д.т.н. Ручинский В.С.

МАИ, Москва

E-mail: darya.slugina.98@bk.ru

В механике деформируемого тела имеются изменения постепенные и внезапные. При осевом деформировании тела с ростом силы пропорционально увеличиваются деформации тела. Но вдруг при небольшом изменении силы деформация получает большой прирост (непропорциональный силе), то есть, возникает пластическая деформация или катастрофа. В современной технике при использовании материалов с малыми запасами прочности, а также при воздействии коррозионных и поверхностно-активных сред во многих случаях необходимо считаться с возможностью работы материала в течение некоторого времени при наличии микротрещин. Существует несколько механизмов, объясняющих появление микротрещин при взаимодействии скопления дислокаций во время движения движении летательного аппарата, а именно: слияние дислокаций, заторможенный сдвиг, вскрытие полосы скольжения за счёт её изгиба, реакция объединения с образованием новых дислокация, сливающихся в полосы, пересечение полос скольжения, концентрация напряжений, возникающих от наличия дислокаций на краю субграницы, взаимодействие двойников, влияние поверхности раздела. Взаимодействие точечных дефектов между собой приводит к образованию комплексов. Комплекс может дать дефект в виде плоского «блина» атомной толщины, который может служить прообразом дискообразной микротрещины. В случаях, когда серия дислокаций содержит большое число дислокаций, представление их в виде непрерывного распределения в скоплении дислокаций является достаточно надёжной аппроксимацией дискретной модели. Допустим, что координата дислокации № 1 – x_1 , координата дислокации № 2 – x_2 и так далее, координата дислокации № n – x_n . Силы отталкивания между дислокациями определяют энергию взаимодействия, которая зависит только от их относительного расположения. При равновесии сила, действующая на дислокации от второй до n -ой, равна нулю. Энергия взаимодействия зависит только от относительного расстояния между дислокациями. При равновесии общая сила, действующая на головную дислокацию, уравновешивается внутренним полем напряжений. При однородном внешнем напряжении сила, действующая на головную дислокацию, всегда в n раз больше силы, действующей на отдельную неголовную дислокацию. Рассматривается задача об определении вида распределения дислокаций в скоплении данной длины и при различных видах напряжений. Изучаются серии дислокаций, когда их дискретное распределение можно с хорошим приближением заменить непрерывным распределением. В данной работе рассмотрены катастрофы материалов на микроуровнях. Результаты данной работы могут быть использованы при разработке САПР элементов конструкций летательных аппаратов.

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРУБЧАТОГО ОБРАЗЦА В ХОДЕ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ

Сычев А.С.¹, Ченцов А.В.²

¹МАИ, ²ИПМех РАН

E-mail: sasa300498@yandex.ru

С целью анализа схемы эксперимента по определению механических свойств трубчатых образцов при сжатии между параллельными пластинами выполнена серия экспериментов на резиноподобных полимерных образцах. Модели и подходы, связанные с этим видом нагружения ранее были развиты М. Avalle [1]. В современных условиях, когда распространены технологии изготовления изделий из трубчатых заготовок, особую актуальность приобретают простые методы оценки механических свойств трубчатых образцов, и в первую очередь – неразрушающие методы. В работе представлены результаты обработки экспериментов и проанализированы известные стандарты на подобные виды испытаний.

Материал образца предполагался изотропным. Начальная линейная стадия сжатия соотносилась с упругим режимом реакции материала. Циклические нагружения выявили гиперупругий характер поведения материала.

Кольцеобразный полимерный образец был закреплен между плоскими платформами из алюминия. Сжатие образцов выполнялось со скоростью 1 мм/мин. При этом были получены навыки управления установкой «MTS Synergie 400» и её программным обеспечением. Эксперимент по сжатию трубки проводился по 3 раза в вертикальном положении и по 3 раза в поперечном. Продольные деформации регистрировались напрямую с датчика перемещения. Распределение поперечных деформаций восстанавливалось по расшифровке кадров видеозаписи в программе GOM Correlate путем создания виртуальных экстензометров.

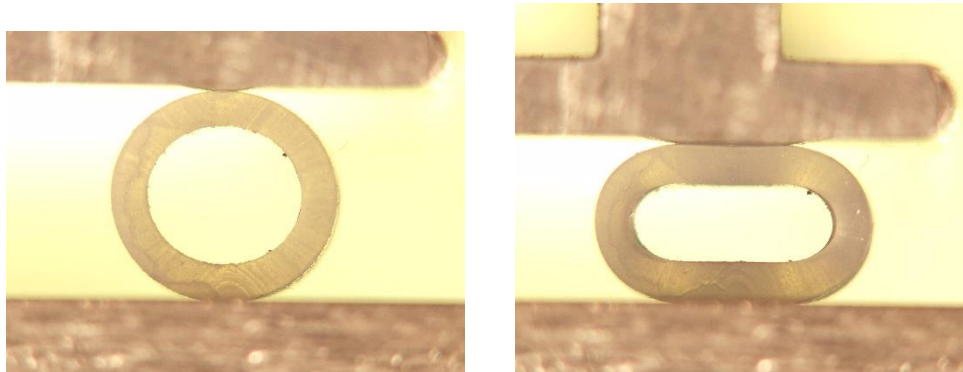


Рис.1. Вид образца в зажимах испытательной системы до и после приложения нагрузки (начальный диаметр трубки около 6 мм)

Полученные данные занесены в Microsoft Excel и обработаны. По данным с графика получен модуль упругости $E=0,57$ МПа. (Начальный радиус $r=3,075$ мм, удлинение $\Delta l=0,496$ мм, площадь сечения $S=11,979$ мм², деформация $\varepsilon=0,16$, напряжение $\sigma=0,093$ МПа.

Работа выполнена по теме госзадания № АААА-А17-117021310373-3 и частично в рамках проекта РФФИ № 17-01-00526.

Литература

1. Avalle, M., Goglio, L. Lateral compression of thin-walled tubes: Strain measurement by image analysis // *Experimental Mechanics*. 1999. V.39. N.3. PP. 231-235. DOI:10.1007/BF02323557.

ТЕПЛООБМЕН В СВЕРХЗВУКОВЫХ ПОТОКАХ ДИССОЦИИРОВАННОГО ВОЗДУХА

Тептеева Е.С.¹, Колесников А.Ф.²

¹МАИ

²ИПМех РАН

E-mail: elrick.com@mail.ru, koles@ipmnet.ru

Один из способов определения каталитической активности материала основан на измерении теплового потока к поверхности модели. Ставится задача о течении вязкого диссоциированного воздуха вблизи оси симметрии гладкого затупленного тела. Предполагается численное исследование течения вблизи оси симметрии.

Введение. Создание неразрушаемых теплозащитных покрытий, выдерживающих интенсивные тепловые воздействия в течение многих циклов, до сих пор является актуальной проблемой. Ранее тепловая защита космических аппаратов обеспечивалась разрушаемыми под действиями тепловых потоков теплозащитными покрытиями. Сейчас же вход в атмосферу осуществляется по траекториям, которые характеризуются меньшими тепловыми потоками, что открывает принципиальную возможность создания неразрушаемых теплозащитных покрытий.

Методы. Для решения поставленной проблемы необходимо построить модель физико-химических процессов, протекающих на поверхности материала в условиях реального полета. Один из способов экспериментального определения каталитической активности основан на измерении теплового потока к поверхности модели, обтекаемой сверхзвуковым потоком диссоциированного воздуха. Такой поток в большинстве случаев создается в газодинамических сверхзвуковых установках с электродуговым нагревом. Существенный недостаток таких установок связан с наличием примесей продуктов разрушения электродов в потоке, что приводит к неправильным результатам при измерении тепловых потоков. Перспективным для этих задач представляется применение индукционного высокочастотного плазмотрона с идеально чистым потоком плазмы воздуха и других газов и смесей в сочетании с отличной воспроизводимостью параметров потока. Параметры потока, реализуемые индукционным высокочастотным плазмотроном, соответствующие параметрам в ядре струи, и параметры модели приведены в таблице 1.

Таблица 1

| Параметры потока | |
|-----------------------------------|------------------------|
| Число Кнудсена, Kn_∞ | 0.0048 |
| Число Маха, M_∞ | 3.0 |
| Число Рейнольдса, Re_∞ | 924.5 |
| Число Рейнольдса, Re_S | 419.2 |
| Скорость, км/сек | 3.932 |
| Полная энтальпия, мдж/кг | 18.25 |
| Температура, °К | 3300 |
| Давление, атм | 0.02 |
| Плотность, кг/м ³ | $0.1618 \cdot 10^{-2}$ |
| Молекулярный вес, г/моль | 22.212 |
| Отношение теплоемкостей, γ | 1.39 |
| Число Прандтля, σ | 0.811 |
| Вязкость, г/см·сек | $0.1032 \cdot 10^{-2}$ |
| Температура стенки, °К | 300 |
| Температурный фактор | 0.033 |

| | |
|-------------------|-------------------------|
| Радиус сферы, см | 1.5 |
| Химический состав | |
| N ₂ | 0.6672 |
| O ₂ | 0.5180·10 ⁻³ |
| NO | 0.1335·10 ⁻¹ |
| N | 0.9207·10 ⁻¹ |
| O | 0.2269 |

Как видно из таблицы 1, химический состав набегающего потока неравновесный. Предполагается, что после прохождения через критическое сечение поток «замораживается». Такой способ определения состава является достаточно грубым, но тем не менее, эти значения параметров набегающего потока позволяют получить правильную картину течения и оценить его параметры.

Решение задач об обтекании тел сверхзвуковым потоком вязкого газа с использованием полных уравнений Навье-Стокса представляет большие трудности в силу эллиптического типа уравнений, нелинейности и наличия малых параметров при старших производных. Численные решения таких задач существующими методами требуют больших затрат машинного времени. В связи с этим, преобразуем систему уравнений Навье-Стокса к новым независимым переменным типа переменных Дороднищина:

$$\xi = \frac{\bar{x}}{R}, \quad \eta = \frac{1}{\Delta(\xi)} \int_0^y \rho r^\nu dy. \quad (1)$$

А так же введем новую функцию

$$\Psi(\xi \cdot \eta) = r^{\nu+1} = 1 + (\nu + 1) \Delta \int_0^\eta \frac{d\eta}{\rho} \quad (2)$$

с учетом того, что

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{(\nu + 1) \Delta(x)} \frac{\partial \Psi}{\partial \eta}. \quad (3)$$

$\rho^\nu \Psi = f$, где f – приведенная функция тока.

Как итог, имеем приближенные уравнения параболического типа в том числе для функции Ψ , полученные из уравнений Навье-Стокса на основе оценок порядков членов этих уравнений в ударном слое около гладкого затупленного тела. Граничные условия выставляются на теле и в невозмущенном потоке, полагается, что химические реакции в потоке не протекают. Предполагается численное исследование течения вблизи оси симметрии гладкого затупленного тела с идеально некаталитической поверхностью.

Следует заметить, что эти оценки будут справедливы для гладких тел и, соответственно, приближенные уравнения могут быть применены для расчета обтекания лишь таких тел, например, для сферы.

Литература

1. Гершбейн Э.А., Колесников А.Ф. «Численное решение уравнений Навье-Стокса в окрестности притупления тел, обтекаемых гиперзвуковым потоком разреженного газа при наличии вдува. – Аэродинамика гиперзвуковых течений при наличии вдува. Сб. тем. ст. Ин-т механики МГУ. Под ред. Г.А. Тирского. Изд-во МГУ, 1978
2. Громов В.Г., Кессель В.Л. Метод численного исследования обтекания затупленных тел сверхзвуковым потоком вязкого газа. Ин-т механики МГУ, Научные труды №1, Изд-во МГУ, 1970.

УСТОЙЧИВОЕ РАСТЯЖЕНИЕ МАТЕРИАЛА ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ НА ОСНОВЕ КРИТЕРИЯ ДРУККЕРА

Терауд В.В.^{1,2}, Валисовский Н.Е.³

¹ НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова

² Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

³ ИПЦАП им. Н.А. Пилюгина

E-mail: ldrnww@gmail.com

Рассматривается растяжение изотропного образца при установившейся ползучести. На основе постулата устойчивости Друккера получено математическое неравенство, характеризующее потерю устойчивости в процессе ползучести растягиваемого образца. В качестве примера приведен расчет потери устойчивого растяжения на данных, взятых из литературы.

Введение. При растяжении образцов в процессе ползучести в какой-то момент времени может происходить потеря устойчивости. В этот момент времени τ однородное деформирование переходит в неоднородное, с образованием локализации деформаций (шейки). После этого существенно уменьшается несущая способность образца.

Обычно считается, что момент локализации происходит незадолго до разрушения, поэтому часто принято считать что $\tau \approx (0,9 \div 0,95) \cdot t^*$, где t^* – длительность процесса ползучести вплоть до разрушения. Для аналитического исследования длительной прочности в конце 50-х гг. XX в. двое выдающихся советских ученых Л.М. Качанов и Ю.Н. Работнов впервые ввели понятие параметра поврежденности и с его помощью описали длительную прочность металлов при одноосном растяжении. Развитие этой теории приведено в работах множества авторов [1–4].

Для определения момента появления шейки разными учеными используются различные подходы [5–7]. Экспериментальное определение момента локализации деформаций приведено в [8]. Здесь предлагается простой математический критерий определения момента появления шейки по данным удлинения образца от времени.

Методы. В работе [9] Друккером приведен простой критерий устойчивого деформирования материала: деформирование материала в изотермических условиях устойчиво в малом, если мощность бесконечно малых приращений обобщённых сил dQ_i на бесконечно малых приращениях соответствующих скоростей обобщённых перемещений dv_i неотрицательна.

$$dQ_i dv_i \geq 0 \quad (1)$$

В работе [10] приведены подробные выкладки, использующие данный постулат Друккера, для получения неравенства, описывающего устойчивое деформирование при одноосном растяжении:

$$\ddot{p} + \dot{p}^2 \leq 0 \quad (2)$$

Обозначая левую часть $\Theta(t)$, получаем условие устойчивости (1) в виде:

$$\Theta(t) \leq 0 \quad (3)$$

Пример расчета. В качестве примера расчета используются данные о длительной прочности модифицированной стали 9Cr-1M при 550°C на цилиндрических образцах длиной 32мм и диаметром 6.25 мм из работы [11]. Используются три эксперимента, проводимых при следующих значениях начальных растягивающих напряжениях: $\sigma_1 = 250$ МПа, $\sigma_2 = 260$ МПа, $\sigma_3 = 275$ МПа. На рис. 1а приведены зависимости деформации ползучести $p(t)$ из работы [11] – кривые длительной прочности. По выражению (2) были вычислены зависимости $\Theta(t)$ для этих кривых, они представлены на рис. 1б.

Вычисления показали, что для трех приведенных значений начальных напряжений моменты локализации, характеризующие появление шейки, составили: $\tau_1 = 324$ ч, $\tau_2 = 53,5$ ч, $\tau_3 = 21,3$ ч. Эти данные нанесены на оригинальные кривые длительной прочности $p(t)$ и обозначены точками на рис 1а. Данные точки делят всю кривую $p(t)$ на участок устойчивого растяжения (левая часть) и зону деформирования образца с локализацией деформаций (правая часть). Как можно видеть из рисунка, правая часть кривых ползучести составляет

существенную долю длительности жизни образца.

Время до разрушения для этих образцов, вычисленные по графику из [11] (в статье [11] не приведены числовые значения), составили 464 ч, 95 ч и 43 ч соответственно. Отсюда относительное время ($\bar{\tau} = \tau/t^*$) деформирования без образования локализации деформаций составило соответственно: 50 %, 56 % и 70 % от времени до разрушения.

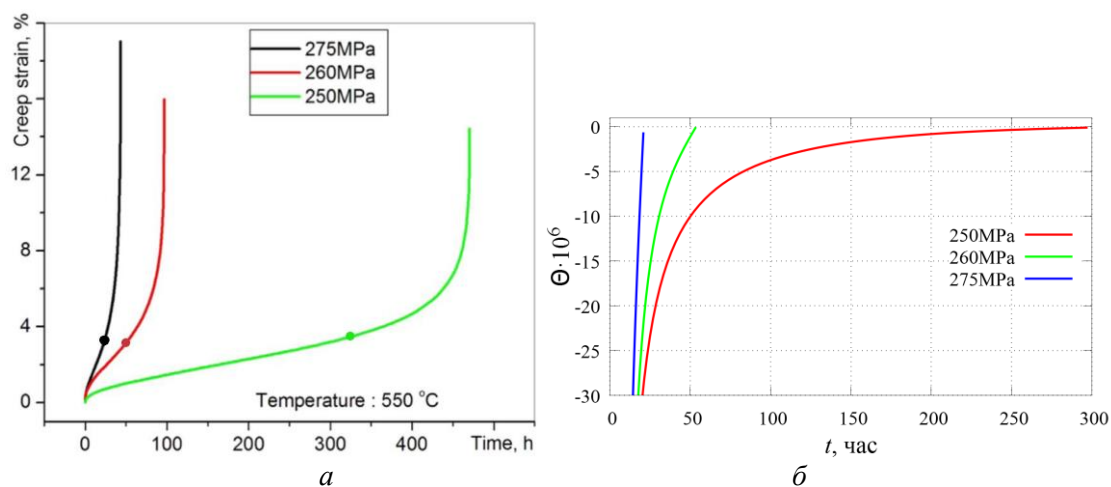


Рис.1. Оригинальный график [11] деформации образца $p(t)$ от времени ползучести – (а) и зависимости $\Theta(t)$ – (б). Дополнительно точками на (а) обозначены вычисленные моменты локализации.

Литература

1. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука. 1966. –752 с.
2. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. М.: Наука, 1974. - 312 с.
3. Соснин О.В, Горев Б.В., Никитенко А.Ф. Энергетический вариант теории ползучести. Новосибирск: Ин-т гидродин. им. М.А. Лаврентьева, 1986. - 96 с.
4. Локощенко А.М. Ползучесть и длительная прочность металлов. М.: Физматлит, 2016. 504 с. (перевод: Lokoshchenko A.M. Creep and long-term strength of metals. CISP. CRC Press. Taylor & Francis Group. Boca. Raton. London. New York. 2018. 545 p.).
5. Swift H. Plastic instability under plane stress // J. Mechanics Physics Solids. 1952. Vol. 1. P. 1–18.
6. Hill R. On discontinuous plastic states, with special reference to localized necking in thin sheets // J. Mechanics Physics Solids. 1952. Vol. 1. P. 19–30.
7. Hora P., Tong L., Reissner J. A prediction method for ductile sheet metal failure in FE-simulation // Proc. of NUMISHEET'96 Conference. MI. USA. 1996. P. 252–256.
8. Терауд В.В. Экспериментальные критерии образования локализации деформаций ползучести в прямоугольных образцах при высокой температуре // Вестник машиностроения. 2017. № 7. С. 28–34.
9. Drucker D. A definition of stable inelastic material // Trans. ASME. Ser. E. J. Appl. Mech. 1959. Vol. 6. No. 1. P. 101. (рус. перев.: Механика. Сб. перев., 1960. № 2. С. 55).
10. Терауд В.В. Экспериментальная проверка теоретического критерия устойчивого растяжения при ползучести для упрочняющихся материалов // Машиностроение и инженерное образование. №3. 2018 г. С.14-18.
11. Guguloth K., Roy N. Creep deformation behavior of 9Cr1MoVNb (ASME Grade 91) steel // Materials Science & Engineering. 2017. Vol. 680. P. 388–404.

ВОЛНОВОДНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ (ВМК) РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Терещенко П.А.

Научный руководитель — профессор, д.ф.-м.н. Беклемишев Н.Н.

МАИ, Москва

E-mail: tereshchenkopetr@gmail.com

Кроме традиционного использования точечных датчиков, связанных с центром обработки измеренных физико-механических параметров информационным кабелем, за последнее десятилетие в странах ЕС и США успешно реализован ряд пилотных проектов по внедрению и эксплуатации волоконно-оптических систем контроля состояния мостов, линий электропередач, для измерения распределения механических нагрузок в конструкционных материалах лопастей вертолетов и крыльев самолетов. При этом из новых и наиболее перспективных вариантов распределенных волоконно-оптических датчиков температуры, давления, вибраций и механических деформаций являются датчики с использованием оптоволоконных «брэгговских решеток».

ВМК основан на создании и использовании информационно-измерительного оптоволоконного кабеля (ИИОК), выполняющего одновременно функции распределенного чувствительного элемента и линии передачи информации. ИИОК закрепляют на поверхности или располагают вблизи контролируемого протяженного объекта. Вдоль оси ИИОК обеспечивается направленное воздействие полей мод волновой энергии по крайней мере одного опорного и одного измерительного каналов ИИОК в зависимости от изменения контролируемого параметра, характеризующего состояние длинномерного объекта.

В работе коротко описаны особенности современного применения ВМК для контроля состояния протяженных объектов с применением дифференциального и интегрального принципов измерения распределения кривизны, кручения а также полей вибраций и температуры вдоль заданных осью ИИОК дуговой координаты. Приведено теоретическое обоснование и результаты экспериментальных исследований этих двух принципов ВМК с анализом требований к параметрам ИИОК и модулированному по времени опорному сигналу с использованием теории связанных волноводных линий передачи и спектрального анализа сигналов.

Для контроля усталостной прочности крыла фиксируют количество циклических изменений распределений кривизны и кручения его поверхности во времени. Полученные данные хранят в памяти для последующего сравнения предельно-установленными значениями циклических нагрузок.

Для определения мест возникновения скрытых дефектов крыла фиксируют изменения распределении изгибной и крутильной жесткостей крыла при одинаковых нагрузках в процессе эксплуатации самолета (рулежка, взлет, крейсерский режим, разворот, снижение, посадка).

Относительная погрешность ВМК при измерении кривизны образующей поверхности пластины, моделирующей крыло самолета, составила величину порядка 0,01% но, как и разрешающая способность определяется способом закрепления ИИОК на контролируемой поверхности.

Можно утверждать о появлении нового, универсального вида контрольно-измерительной техники, а именно систем контроля физико-механических распределенных параметров, рынок которой только зарождается.

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДУЛЯ ЮНГА И МОДУЛЯ СДВИГА ДЛЯ 6-ТИ КОНСТАНТНЫХ ТЕТРАГОНАЛЬНЫХ КРИСТАЛЛОВ

Ткаченко В.Г.

Научный руководитель – к.ф.-м.н. Лисовенко Д.С.

ИПМех РАН

E-mail: tkvalent@mail.ru

В настоящее время все больше возникает потребность в использовании различных микроэлементов. По этой причине современное материаловедение отдельное внимание уделяет изучению материалов на наноразмерных масштабах, так как характеристики на различных масштабах у одного и того же материала могут быть различными.

Исследованы упругие характеристики 6-ти константных тетрагональных материалов, а именно, модуль Юнга и модуль сдвига (коэффициент Пуассона исследован в работе [1]) по значениям коэффициентов податливости, экспериментальные данные которых приведены в справочнике Ландолта-Бернштейна.

Для тетрагональных кристаллов вычислены глобальные максимальные и минимальные значения модуля сдвига, при этом экстремальные характеристики оценивались методом уровней. Также приведены данные по степени анизотропии кристалла, показывающий отношение максимального к минимальному значению модуля сдвига. Произведен численный расчет модуля сдвига для основных кристаллографических направлений для 98 тетрагональных кристаллов. Наибольший интерес представляют вещества с высокой степенью анизотропии, а также, наоборот, вещества с малой степенью анизотропии, которые в некотором приближении можно считать изотропными. Отдельно выделены важные для приложения кристаллы, для которых построены ориентационные зависимости модуля сдвига.

Для тетрагональных кристаллов получены аналитические выражения для стационарных значений модуля Юнга и дан их численный анализ. Получено пять стационарных значений, три из которых имеют простой вид. Для каждого стационарного значения проведено исследование достаточного условия экстремума функции двух переменных. Показано на основе экспериментальных данных из справочника Ландолта-Бернштейна, что из пяти стационарных значений, лишь четыре могут быть экстремумами.

Исследование выполнено в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН I.2.32.

Литература

1. Гольдштейн Р.В., Городцов В.А., Лисовенко Д.С., Волков М.А. Ауксетики среди 6-ти константных тетрагональных кристаллов // Письма о материалах, 2015, Т.5, В.4, С.409-413.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕСТИУГОЛЬНОЙ АУКСЕТИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ

Фадеев Е.П., Лаврентьев С.Ю., Ченцов А.В.

ИПМех РАН

E-mail: fadeevegor@yandex.ru

На сегодняшний день, к метаматериалам, таким как ауксетики, приковано пристальное внимание в связи с их необычными механическими свойствами. Важным свойством ауксетиков является их отрицательный коэффициент Пуассона, т.е. свойство материала при растяжении расширяться в сечении перпендикулярном направлению растяжения.

В связи с этим исследование механических свойств вогнутой шестиугольной ауксетической конструкции представляется актуальным. Механические свойства такой и схожей конструкции с криволинейными ребрами изготовленной из полиэтилентерефталата (ПЭТ-а аморфный) исследованы в [1, 2]. В настоящей работе, образец, размерами $95 \times 24 \times 1$ мм с центральной зоной $28.9 \times 24 \times 1$ мм, был изготовлен из неауксетического резиноподобного материала, методом лазерной резки. В ходе эксперимента образец был подвергнут монотонному одноосному растяжению на универсальной растягивающей установке (MTS Synergie 400) при скорости растяжения 0.5 мм в минуту, при одновременной регистрации перемещений и растягивающей силы. Максимальное удлинение центральной зоны составило 6 мм. Изменение геометрии образца в течение эксперимента регистрировалось на камеру Dahua IPC-HF81200E с разрешением 12 мегапикселей для последующей покадровой обработки.

Построена механико-математическая модель центральной зоны образца, состоящая из стержней, шарнирно соединенных в узлах решетки ячеистой структуры, повторяющей геометрию реального образца, с дополнительными пружинами между стержнями в острых углах. В состоянии покоя горизонтальные стержни имели длину 6.2 мм, а наклонных 3.3 мм, при это их наклон составил 47.5° . Условия на границах расчетной области: боковые границы свободны, нижняя жестко закреплена, верхняя сохраняет форму и смещается конечными приращениями. Для стержневой модели построен функционал упругой энергии деформирования. Параметры, которые необходимы для вычисления значения функционала, включают в себя модуль Юнга, который отвечает за энергию изменения длин стержней, и параметр, отвечающий за энергию изменения величин углов между стержнями. Величина модуля Юнга получена экспериментально. Второй коэффициент вычислен по результатам экспериментов с ячеистой структурой. В предположении, что он является характеристикой конструкции, этот параметр был принят постоянным.

По результатам эксперимента модуль Юнга резиноподобного материала оказался равен 1.05 МПа, а эффективный модуль образца составил 0.042 МПа. С помощью метода корреляции цифровых изображений были вычислены смещения узлов и коэффициент Пуассона ячеистой структуры в зависимости от деформаций. Исходя из этих данных был вычислен второй параметр функционала и оказался равным 0.24 мДж. По результатам минимизации функционала с таким параметром вычисленные и полученные из эксперимента величины коэффициента Пуассона и эффективного модуля Юнга образца хорошо согласовывались вплоть до 3.5% продольной деформации. При величинах продольной деформации больших чем 3.5% расчеты коэффициента Пуассона и модуля Юнга с постоянным вторым параметром плохо согласовывались с результатами эксперимента, когда визуально наблюдался изгиб стержней ячеистой структуры. При подборе второго параметр системы на каждом стадии растяжения, так чтобы хорошо согласовывались смещения узлов ячеистой структуры, расчеты модуля Юнга системы согласовались хорошо.

Таким образом, стержневая модель адекватно описывает вышеописанную ауксетическую ячеистую структуру при деформациях меньших 3.5%. При этом, при больших деформациях модель всё ещё даёт адекватный результат, если подбирать второй параметр системы.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, проект №18-79-102-70.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КООРДИНАТНО-ЗАВИСИМОЙ ДИФФУЗИИ ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОФИЛЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФОСФОРА В ГЕРМАНИИ В ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}/\text{In}_{0.56}\text{Ga}_{0.44}\text{P}/\text{Ge}(\text{Ga})$

Фомин В.М.
НИТУ «МИСиС»
E-mail: vlifom@yandex.ru

В работе анализировали профили распределения фосфора в германии в гетероструктуре $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}/\text{In}_{0.56}\text{Ga}_{0.44}\text{P}/\text{Ge}$, полученные при формировании мультикаскадного солнечного элемента. В процессе диффузии формируются два p-n перехода, что связано с большей растворимостью галлия чем фосфора в германии. Для расчета коэффициента диффузии (D_p) применяли метод координатно-зависимой диффузии, в котором учтены как диффузионная, так и дрейфовая компоненты движения атомов фосфора. Показано, что диффузия фосфора в присутствии галлия также идет в составе акцепторных комплексов с вакансией германия.

Введение. В связи с развитием технологии многокаскадных солнечных элементов (МК СЭ) возрос интерес к германию как к подложке и материалу первого каскада МК СЭ на основе соединений A^3B^5 [1]. При формировании первого каскада МК СЭ диффузия фосфора идет из буферного слоя InGaP в сильно легированный галлием германий. Растворимость Ga на интерфейсе InGaP/Ge выше, чем P, что приводит к образованию двух p-n переходов, и на профиле фосфора выделяются 3 участка, границы которых определяются формирующимися p-n переходами. Целью данной работы является анализ диффузионных профилей и расчет коэффициентов диффузии фосфора в германии в условиях формирования p-n перехода первого каскада МК СЭ.

Изготовление образцов. Образцы для исследования получены методом МОС-гидридной эпитаксии на реакторе Veeco E450 LDM. Образец представлял германиевую подложку ориентацией (100), легированную галлием ($N_{\text{Ga}} = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), обработанную потоком фосфина при температуре 635°C в течение 2.5 мин. Затем был нанесен буферный слой $\text{In}_{0.56}\text{Ga}_{0.44}\text{P}$ (1 мин., $T = 635^\circ\text{C}$) и сильнолегированный слой $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}$ (1.6 мин при той же температуре). Измерения профилей распределения галлия, фосфора и германия проведены методом вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) на установке РНИ-6600.

Расчет коэффициента диффузии фосфора. Расчет коэффициента диффузии проводили методом координатно-зависимой диффузии (КЗД) [2]. В методе КЗД рассматривается два механизма перемещения атомов - за счет градиента концентрации (собственно диффузия) и за счет дрейфа со скоростью $V(x)$ под действием полей (электрических или полей упругих напряжений). Уравнение непрерывности записывается в виде:

$$\frac{\partial c_x}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial c_x}{\partial x} - V(x) c_x \right) = 0 \quad (1)$$

Коэффициент диффузии D и дрейфовая скорость V определяются через один параметр — среднее расстояние между соседними местами λ и две переменные: вероятность скачкообразного процесса $\varphi(x)$ и вероятность того, что ближайшее свободное место для диффузии будет пустым $\gamma(x)$.

$$D(x) = \varphi(x) \gamma(x) \lambda^2$$
$$V(x) = \left(\gamma(x) \frac{\partial \varphi(x)}{\partial x} - \varphi(x) \frac{\partial \gamma(x)}{\partial x} \right) \gamma^2$$

Численное решение уравнения диффузии находили методом конечных разностей. Полученные максимальные значения коэффициента диффузии $D_p \cong 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$ превышали известные в литературе данные для температуры 635°C , наблюдалась сильная зависимость D_p от расстояния до границы гетероструктуры.

Для анализа механизма диффузии проведен расчет распределения концентрации свободных носителей заряда (СНЗ) n и p по образцу при температуре диффузии (см. рис. Рис. 2).

$$C_p^+(x) + p(x) - n(x) - C_{\text{Ga}}^-(x) = 0 \quad (2)$$

Начало координат на рис. Рис. 2 соответствует границе гетероструктуры $\text{In}_{0.56}\text{Ga}_{0.44}\text{P}/\text{Ge}$. Первый p-n переход лежит на глубине 28-30 нм, второй — 120 - 125 нм.

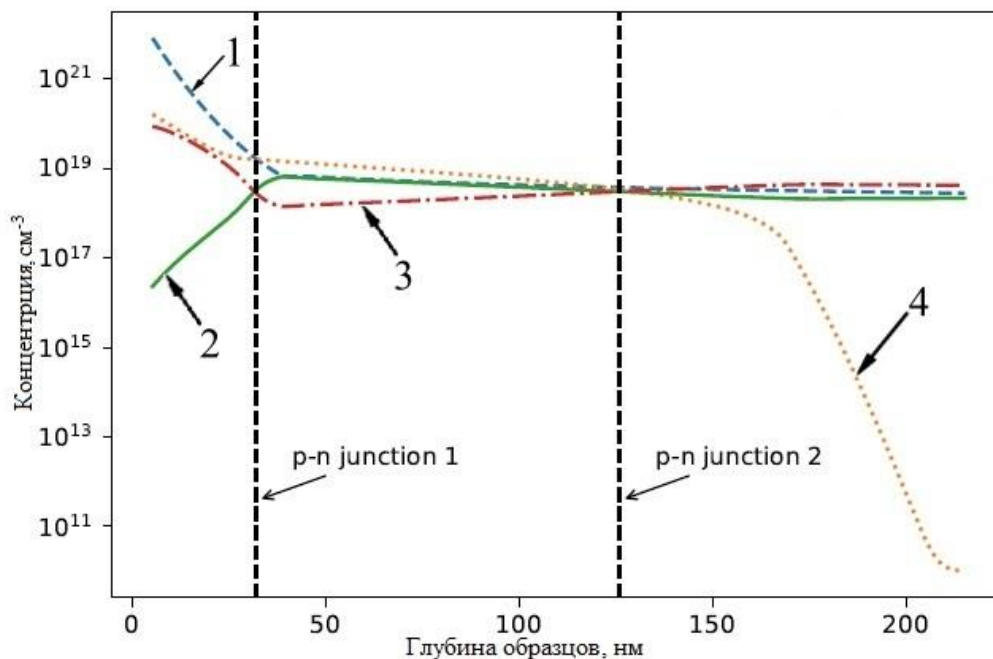


Рис. 2. Профили фосфора, галлия и концентрация свободных носителей заряда в германии.
1: C_{Ga} , 2: n , 3: p , 4: C_p .

На границе гетероструктуры концентрации элементов превышают значения плотности состояний в зоне проводимости и в валентной зоне при температуре диффузии, т.е. германий в этой области вырожден, поэтому концентрацию электронов и дырок определяли по распределению Ферми-Дирака.

Численные расчеты уравнения электронейтральности (2) проводили методом Ньютона. В области пространственного заряда (ОПЗ) р-n переходов уравнение электронейтральности не выполняется и концентрации СНЗ рассчитывают, решая уравнение Пуассона, но при большой концентрации примеси размеры первого ОПЗ не превышают 5 – 6 нм и мы сочли возможным пренебречь этой областью и ограничиться определением n и p из уравнения электронейтральности.

Электрическое поле первого р-n перехода направлено к границе гетероструктуры, второго р-n перехода – от границы. Можно ожидать, что поле первого р-n перехода будет ускорять диффузию отрицательно заряженных атомов или комплексов (Ga и комплексы (PV)) и замедлять диффузию положительно заряженных атомов (P^+). Поле второго, более глубокого р-n перехода, будет действовать в обратную сторону. Была получена следующая тенденция поведения D_p : рост в области первого р-n перехода и уменьшение в области второго. Такое может наблюдаться, если диффузия фосфора проходит в составе отрицательно заряженных комплексов, каковыми являются комплексы фосфор-вакансия германия. Последняя является акцептором с зарядовыми состояниями от одного до трех, в результате чего комплекс PV может быть нейтральным, одно- или двукратно отрицательно заряженным [3]. Таким образом подтверждено, что и в случае совместной с галлием диффузии фосфора его диффузия происходит в составе отрицательно заряженных комплексов PV .

Для анализа зависимости коэффициента диффузии от параметров материала были построены зависимости D_p от n (см. рис.Рис.3). Там же приведены литературные данные для т.н. кубического ($D_p \sim n^3$) и квадратичного ($D_p \sim n^2$) механизмов диффузии. Нумерация областей на рисунке Рис.3 начинается от границы гетероструктуры. Область 1 соответствует р-типу проводимости на границе гетероструктуры, 2,5 - области первого и второго р-n переходов соответственно, 3,4 - электронная область между двумя р-n переходами. Глубины р-n переходов – 1: $0 < x < 25$ нм, 2: $25 < x < 33$ нм, 3: $33 < x < 60$ нм, 4: $60 < x < 100$ нм, 5: $x > 100$ нм.

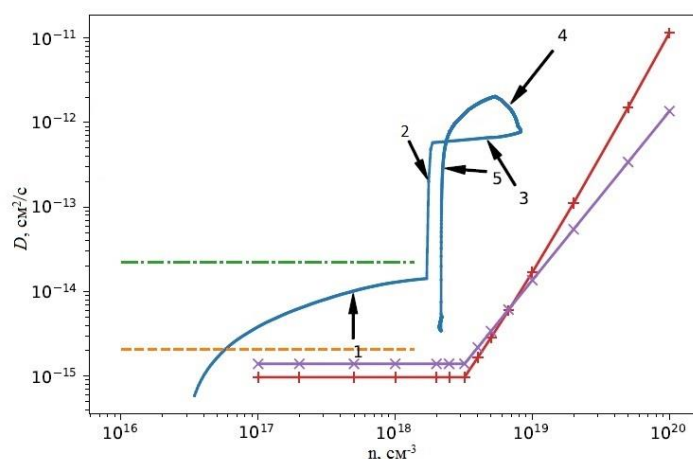


Рис.3. Зависимость D_p от концентрации электронов.

Как видно из рисунка Рис.3, полученные в данной работе D_p превышают литературные данные, однако в области, близкой к собственной, в результатах, полученных методом КЗД, наблюдается общая тенденция роста D_p с увеличением n , характерная для диффузии в составе отрицательно заряженных комплексов PV.

В целом тенденция роста D с концентрацией n подтверждается, хотя имеется ряд особенностей, связанных вероятнее всего, как с участием галлия в процессе диффузии, так и с влиянием электрических полей p-n переходов на процесс диффузии.

В работе впервые получены значения D_p в дырочной области у границы гетероструктуры. Поскольку при этом уровень Ферми растет и приближается к середине зоны, можно ожидать, что увеличивается доля вакансий в максимальном зарядовом состоянии и возможен переход от квадратичной к кубической диффузии. Замедление темпов роста D_p может быть связано с уменьшением полной концентрации вакансий.

В электронной области структуры между двумя переходами D_p слабо зависит от n . Это может быть связано с рядом причин, в первую очередь с торможением комплексов PV полями p-n переходов.

Выводы. Для диффузионного профиля фосфора в германии в гетероструктуре $In_{0.56}Ga_{0.44}P/Ge$ проведены расчеты D_p в зависимости от расстояния от границы гетероструктуры методом КЗД. Было показано, что значения D_p , полученные методом КЗД превышали известные в литературе данные для температуры $635^\circ C$. Последнее обстоятельство связано с тем, что в методе КЗД учитывается как диффузионная, так и дрейфовая компонента перемещения атомов фосфора в решетке германия, наблюдалась сильная зависимость D_p от расстояния до границы гетероструктуры.

При наличии двух p-n переходов дрейфовая компонента может быть связана с движением заряженных частиц под действием электрических полей переходов.

Показано, что D_p растет с ростом n , что указывает на вакансионный механизм диффузии фосфора в германии, также, как и при диффузии фосфора в отсутствие других типов примеси.

Показано, что в дырочной области германия D_p растет с концентрацией электронов, что можно объяснить также вакансионным механизмом диффузии, причем в связи с ростом уровня Ферми возможен переход от квадратичной к кубической диффузии.

Литература

1. King R. R., Bhusari D., Larrabee D., Liu X.-Q., Rehder E., Edmondson K., Cotal H., Jones R. K., Ermer J. H., Fetzer C. M., Law D. C., Karam N. H. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 20, no. 6, pp. 801–815, 2012.
2. Малкович Р.Ш. К анализу координатно-зависимой диффузии. ЖТФ т. 76, вып. 2 вып. (2006) с. 137-140.
3. Brotzmann S, Bracht H. Intrinsic and extrinsic diffusion of phosphorus, arsenic, and antimony in germanium. J. Appl. Phys. 2008; 103: 033508. DOI:<https://doi.org/10.1063/1.2837103>.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫТЯЖКИ С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ УТОНЕНИЕМ АНИЗОТРОПНОГО МАТЕРИАЛА

Халикова А.А.

Научный руководитель — доцент, к.т.н. Звонов С.Ю.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», Самара

E-mail: alsu.khalikova.95@mail.ru

Для получения конических деталей с цилиндрическими поясками типа «форсунка» в Самарском университете разработана методика проектирования процесса вытяжки с принудительным утонением стенки изотропного материала, однако это является идеализированным процессом, а в реальных условиях металл имеет различные свойства относительно направления прокатки.

Цель работы: исследование процесса вытяжки с принудительным утонением, учитывая показатели анизотропии, и дальнейшее сравнение результатов.

Методика исследования состояла в том, чтобы используя предложенный способ вытяжки и инженерный метод решения, записать уравнение равновесия для сил конического участка заготовки, учитывая при этом показатели анизотропии.

Для подтверждения рассматриваемой методики проектирования проведены экспериментальные испытания на растяжение, а так же вытяжку с принудительным утонением.

Испытания на растяжение проводили на пропорциональных плоских образцах без головки, которые вырезались из холоднокатанного листа под углами 0° , 45° , 90° к линии проката. Для регулирования формирования показателей анизотропии для сплава 8011 была назначена температура термообработки и время выдержки с учетом степени обжатия при прокатке согласно работам [1, с. 408] Гречникова Ф. В. Полученные диаграммы растяжения показали, что свойства материала по всем направлениям прокатки одинаковы.

Исследования на вытяжку с принудительным утонением проводили с коэффициентом трения $\mu=0,15$. Значение коэффициента трения зависело от выбора смазки. В работе использовалась смазка Графитная Ж.

Чтобы получить необходимое распределение толщин детали у матрицы должно быть два рабочих пояска: верхний, который формирует утолщенную часть на торце заготовки и нижний, который обеспечивает минимальную толщину на цилиндрическом участке [4].

Контроль толщины заготовок, осуществляемый после каждой стадии процесса вытяжки с принудительным утонением, показал, что толщина стенки в деталях во всех секторах одинакова. Следовательно, разнотолщинность вдоль образующей отсутствует.

Таким образом, данные полученные при теоретическом анализе напряженно-деформированного состояния детали с учетом показателей анизотропии в работе [5, с 77] были применены во время эксперимента, что позволило контролировать характеристики разнотолщинности в процессе формоизменения. При сравнении экспериментальных данных и моделирования были получены графики усилия, которые показали, что теоретические доводы оправданы. Погрешность составила менее 10%.

Литература

1. Гречников, Ф.В. Деформирование анизотропных материалов: резервы интенсификации [Текст]/Ф.В. Гречников. – М.: Машиностроение, 1998. – 448 с
2. Grechnikov, F.V., Erisov, Y.A. Scientific Foundations for Creation of Sheet Materials with Specified Crystallography of Structure for Aerospace Applications. // 2018 — Metal Science and Heat Treatment;
3. Демьяненко, Е.Г. Направленное изменение толщины конической оболочки [Текст]/Е.Г. Демьяненко//Тез. докл. Междунар. молод. науч. конф. XV Туполевские чтения. – Казань: Казан. гос. техн. ун-т. – 2007.– Т. 1.–С. 52- 54;
4. Звонов С. Ю., Попов И. П., Шляпугин А. Г. Особенности процесса формирования полых конических деталей из кольцевой заготовки [Текст]/ С. Ю. Звонов// статья. Технология авиационного производства. – Изв. вузов. Авиационная техника – 2010. – С. 358-361;

5. Халикова А. А., Звонов С. Ю. Исследование влияния анизотропии на процесс вытяжки с принудительным утонением [Текст]/ А. А. Халикова// статья. Международная научно-практическая конференция радуга знаний: теоретические и практические аспекты наук. – Ростов - на Дону: Издательский центр «Сфера». – 2018. – С. 76-82.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАПЫЛЕНИЯ ЧАСТИЦ, РАСПРЕДЕЛЁННЫХ В РАЗОГРЕТОМ НИЗКОСКОРОСТНОМ ГАЗОВОМ ПОТОКЕ

Стратула Б.А.

Научный руководитель — профессор, д.ф-м.н. Никитин И.С.

МАИ, Москва

stratula@matway.net

В работе численно-аналитически исследуется процесс напыления микрочастиц металлического сплава. Такого рода технологии используются для поверхностного упрочнения ответственных элементов конструкций или при послойном наращивании изделий для устранения эксплуатационных дефектов. Микрочастицы распределены в горячем газовом потоке, падающем на подвижную подложку. Влияние повышенной температуры, близкой к температуре плавления, проявляется в малом значении предела текучести материала частицы.

При напылении потока частиц образуется слоистая микроструктура наращиваемой части изделия, толщина слоев и ее механические свойства определяются конечной толщиной сплющивания горячих частиц в динамическом процессе деформирования.

Постановка и схема решения задачи о конечной толщине деформированной частицы с некоторыми уточнениями соответствует классической одномерной модели Тейлора для задачи соударения жёстко-пластического цилиндрического стержня с недеформируемой преградой [1]. Для закона упрочнения, близкого к линейному, методом возмущений получены приближенные аналитические оценки для толщины «сплюсненной» частицы, ее радиуса и времени соударения в зависимости от скорости подлета частицы. Численно-аналитически решена система обыкновенных дифференциальных уравнений рассматриваемой приближенной модели.

Проведено сравнение численно-аналитических результатов в одномерном приближении с многомерным моделированием нестационарного процесса соударения по конечно-элементным схемам. Показана работоспособность полученных формул для оценки толщин наращиваемых слоев в зависимости от скорости частиц и температуры потока.

Для оценок геометрических параметров частицы после удара в аналогичной задаче с учетом динамической вязкости за пределом текучести (жестковязкопластическая модель поведения материала частицы) использовано приближенное решение А.Ю. Ишлинского [2]. Показано, что аналогичный результирующий размер частиц достигается при больших температурах вследствие динамического изменения текучести в процессе деформации.

Литература

1. Зукас Дж. А., Николас Т., Свифт Х.Ф. и др. Динамика удара.– М.: Мир. 1985. 296 с.
2. Ишлинский А.Ю. Об ударе вязкопластического стержня о жёсткую преграду// Прикладные задачи механики, Т. 1. Механика вязкопластических и не вполне упругих тел. 1986. С.269–277.

ВОЗМОЖНОСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО НАГРЕВА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ИНДУКЦИОННЫХ ПЛАЗМОТРОНАХ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК (ВГУ)

Щёлоков С.Л., Вельмакин Г.С.

Научный руководитель – д.ф.-м.н. Колесников А.Ф.

МАИ, г. Москва,

E-mail: schelokov.s.99@gmail.com, grigoryii@gmail.com

В работе представлена оценка возможностей индукционного высокочастотного (ВЧ) -плазмотрона ВГУ-4 для моделирования локального конвективного нагрева поверхности в окрестности носового затупления тела при обтекании гиперзвуковым потоком на основе анализа траекторий входа в атмосферу Земли летательных аппаратов IXV (ESA) и «Буран».

Введение. Важной частью создания летательного аппарата является разработка эскизного проекта. Она заключается в обосновании летно-технических характеристик аппарата путем широкого применения экспериментальных работ. Чем лучше проделана эта работа, тем короче будет процесс доводки летательного аппарата, тем раньше летательный аппарат выйдет в полет.

При входе в атмосферу космических аппаратов на больших скоростях происходит аэродинамический нагрев поверхности. Для локального моделирования этого процесса для носовой части необходимо в лабораторных условиях воспроизвести такие параметры как: энтальпия, давление торможения, толщина пограничного слоя. Данные параметры способен моделировать индукционный ВЧ-плазмотрон ВГУ-4 (ИПМех РАН), но необходимо провести качественный анализ на соответствие возможностей ВГУ-4 и условий полета.

Цель данной работы – оценка возможностей индукционного ВЧ-плазмотрона ВГУ-4 для моделирования локального конвективного нагрева поверхности в окрестности носового затупления тела при обтекании гиперзвуковым потоком. Будет выполнен анализ траекторий входа в атмосферу Земли летательных аппаратов IXV (ESA) и «Буран» и методика определения параметров потоков плазмы в установке ВГУ-4, при которых воспроизводится тепловой поток к поверхности в точке торможения на теплонапряженных участках двух траекторий.

Постановка задачи. Для разработки систем тепловой защиты необходимо в лабораторных условиях провести моделирование аэродинамического нагрева аппарата, которое заключается в воспроизведении следующих параметров: энтальпии, давления торможения, толщины пограничного слоя. Эти параметры можно получить на ВЧ плазмотроне ВГУ-4, но сначала необходимо количественно оценить соответствие экспериментальных и натуральных условий.

Высокочастотный индукционный плазмотрон ВГУ-4 имеет следующие параметры: давление в барокамере 0.01–1000 гПа, энтальпия на оси потока 4–55 $\left(\frac{\text{МДж}}{\text{кг}}\right)$ [6]. Для энтальпии указаны предельные значения; в дальнейшей работе нам будет достаточно диапазона 5–45 $\left(\frac{\text{МДж}}{\text{кг}}\right)$. Необходимо оценить входят ли значения траекторий летательных аппаратов в указанные диапазоны.

Теория. Энтальпия потока:

$$H_{\infty} = \frac{v_{\infty}^2}{2} \quad (1)$$

где $H_{\infty} \left[\frac{\text{МДж}}{\text{кг}}\right]$ - полная энтальпия (или энтальпия торможения), а v_{∞} - скорость набегающего потока, относительно инерциальной системы отсчёта, связанной с летательным аппаратом.

Давление, которое испытывает летательный аппарат за ударной волной в критической точке поверхности:

$$p_{W_0} = \rho_{\infty} v_{\infty}^2 \quad (2)$$

где $p_{W_0} \left[\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}\right]$ – давление торможения дозвукового потока в критической точке спускаемого аппарата,

а $\rho_\infty \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right]$ – плотность воздуха на определенной высоте.

Подставляя в (2) скорость из (1) получаем удобную формулу для нахождения давления торможения на данной высоте:

$$p_{W_0} = 2\rho_\infty H_\infty \quad (3)$$

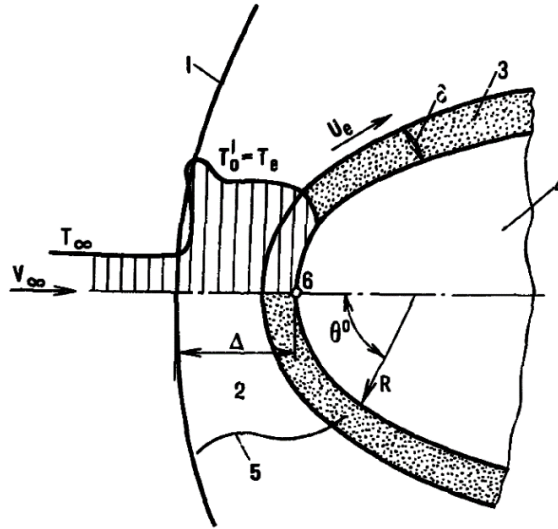


Рис.1. 1 – ударная волна; 3 – пограничный слой; δ – толщина пограничного слоя; 4 – затупленное тело; 6 – точка торможения (или критическая точка); v_∞ – скорость невозмущённого потока.

Конвективный тепловой поток обратно пропорционален толщине пограничного слоя. Если считать стенку идеально каталитической по отношению к рекомбинации атомов N и O, то:

$$q_n \sim \frac{H}{\delta} \quad (4)$$

где δ – толщина пограничного слоя.

$$\delta \sim \left(\frac{du_e}{ds} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

где $\frac{du_e}{ds}$ – градиент скорости. Значит, для того чтобы моделировать тепловой поток, необходимо условие равенства градиентов скоростей. Обозначим градиент скорости как β . Для плазмотрона:

$$\beta_p = \frac{v'}{R_m} \quad (6)$$

где v' – скорость набегающего потока в устройстве плазмотрон, R_m – радиус модели.

Для полета аппарата:

$$\beta_p = \left(\frac{8}{3} \frac{\rho_\infty}{\rho_e} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{v_\infty}{R_W} \quad (7)$$

где R_W – радиус затупления носка летательного аппарата. Отношение $\frac{\rho_\infty}{\rho_e}$ называют *малым параметром* и обозначают k . Параметр k является функцией от высоты и скорости и уже рассчитан [2].

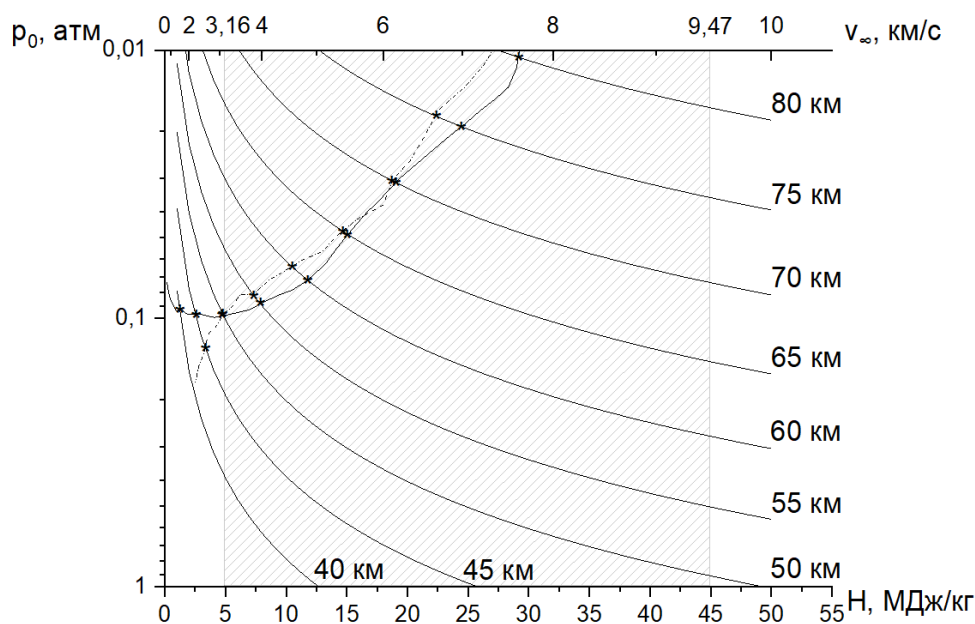
Приравняв формулы (7) и (6), получаем:

$$R_m = \left(\frac{8}{3} k \right)^{-\frac{1}{2}} \frac{R_W v'}{v_\infty} \quad (8)$$

Эта формула описывает какой нужно выбрать радиус модели для того чтобы воспроизвести тепловой поток к поверхности аппарата в критической точке на определенной высоте и

скорости.

Методы. Задача решалась численно на прямоугольной системе координат. В качестве экспериментальных данных были взяты данные траектории «IXV» [3] и «Бурана» [4]. Значения плотности берем из ГОСТ 4401-81 [5]. На основной оси абсцисс отображена энтальпия $\left[\frac{\text{МДж}}{\text{кг}}\right]$ в линейном масштабе, на вспомогательной оси абсцисс отображена скорость $\left[\frac{\text{км}}{\text{с}}\right]$ возрастающая по формуле $f(x) = \sqrt{2x}$ (где за x берётся энтальпия). На оси ординат в логарифмическом масштабе отображено давление [атм]. В этих координатах отобразим линии функций $p_{W_0}(H_\infty)$, вычисляемых по формуле (3), для «IXV» и «Бурана», а также для высот от 40 км с шагом 5 км. Данные графики изображены на рис. 2.



Из рисунка видно, что линии траекторий летательных аппаратов входят в область возможностей моделирования установки ВГУ-4 на промежутке от 50 до 80 км.

Выводы. В настоящей работе выполнено моделирование аэродинамического нагрева

Рис.2. Сплошной линией показана траектория – «IXV», пунктирной – траектория «Бурана»; заштрихованная область – возможности моделирования ВЧ плазмотрона ВГУ-4.

аппарата, движущегося по траекториям летательных аппаратов IXV и «Буран». Представлены расчеты, позволяющие определить параметры потока в ВЧ-плазмотроне и вычислить тепловой поток в заданной точке траектории. Установка ВГУ-4 подходит для локального моделирования аэродинамического нагрева на высотах от 50 до 80 км.

Литература

3. Неравновесные физико-химические процессы в аэродинамике / Под общ. ред. Г.И. Майкапара. – Москва: Машиностроение, 1972. – 344 с.
4. Лунёв, В.В. / Течение реальных газов с большими скоростями. – Москва: Физматлит, 2007. – 759 с.
5. A.Viviani, G.Pezzella. / Aerodynamic and Aerothermodynamic Analysis of Space Mission Vehicles. Springer Aerospace Technology, 2015. – 898 p.
6. Полет орбитального корабля «Буран» [Электронный ресурс] // <http://www.buran.ru>
7. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры (с Изменением N 1) [Электронный ресурс] // <http://docs.cntd.ru/document/gost-4401-81>
8. Высокочастотные индукционные плазмтроны ВГУ-3 и ВГУ-4 [Электронный ресурс] // <http://plasmalab.ipmnet.ru/ru>

ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛА ИНТЕНСИВНЫМИ ПЛАСТИЧЕСКИМИ ДЕФОРМАЦИЯМИ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Яковлев А.Ю., Янц А.Ю.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

E-mail: ya.anton.96@gmail.com

В работе рассматривается повышение предела текучести анизотропного материала за счет изменения текстуры в ходе интенсивных пластических деформаций. Предел текучести является важной характеристикой, которая позволяет оценить насколько долго материал может оставаться в области упругих деформаций. Предложена модификация двухуровневой математической модели с целью определения оптимальной траектории нагружения материала в процессе обработки интенсивными пластическими деформациями таким образом, чтобы предел текучести при воздействии заданным нагружением был максимальным.

На сегодняшний день одним из наиболее часто используемых способов металлообработки является обработка интенсивными пластическими деформациями. Известно, что при интенсивном деформировании образуется кристаллографическая текстура. Кристаллы являются анизотропными относительно большинства свойств, присущих кристаллам. Зависимость от направления может проявляться для кристаллов в упругости, электро- и теплопроводности, в фотоупругости, в электрооптических эффектах и т. д. [1] Соответственно, материал, обладающий кристаллографической текстурой, также будет проявлять различные свойства в различных направлениях.

Поскольку для большинства конструкций известно какой класс нагружений будет испытывать материал в ходе эксплуатации, имеет смысл создание функциональных материалов, которыми считаются материалы с заданными заранее физико-механическими свойствами. Одним из примеров таких материалов является изготовление монокристаллических лопаток двигателей с целью повышения их прочности и износостойкости. В основном материалы эксплуатируются только в области упругих деформаций, таким образом определяющим физико-механическим свойством становится предел текучести, поскольку эта величина характеризует то, как долго материал остается в области упругих деформаций. В таком случае, задача стоит в нахождении способа обработки интенсивными пластическими деформациями материала таким образом, чтобы предел текучести при воздействии определенным классом нагружений был максимален.



Рис.1. Схема изготовления материала

Схематически процесс изготовления материала можно представить в виде Рис. 1. В рамках данной работы рассматриваются дополнительная обработка интенсивными пластическими деформациями полученного в ходе процесса изготовления материала с целью повышения предела текучести для заданного конструктивными особенностями класса нагружений. Обработка заготовки и модификация процесса изготовления на данный момент не рассматривается.

Моделирование процесса деформации происходит при помощи двухуровневой математической модели упруговязкопластического деформирования поликристалла основанной на упруговязкопластической конститутивной модели [2-5]. Двухуровневая модель разделяется на макроуровень – уровень представительного объема поликристалла, и мезоуровень – уровень кристаллита. В математической модели используется несимметричная индифферентная мера скорости деформаций [2, 3], а ротации кристаллитов описываются при помощи введения ПСК, связанной с решеткой [4, 5].

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\boldsymbol{\sigma}} = \boldsymbol{\Pi} : (\mathbf{z} - \mathbf{z}^{\text{in}}), \\ \mathbf{z} = \mathbf{l} - \boldsymbol{\omega}, \\ \mathbf{l} = (\nabla \mathbf{v})^T, \\ \mathbf{z}^{\text{in}} = \sum_{j=1}^J \dot{\gamma}^{(j)} \mathbf{n}^{(j)} \mathbf{b}^{(j)}, \\ \dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0 \left| \frac{\tau}{\tau_c} \right|^{1/m} \mathbf{H}(\tau - \tau_c), \\ \tau = \boldsymbol{\sigma} : \mathbf{n} \mathbf{b}, \\ \dot{\tau}_c^g = G \sum_{h=1}^N a_h^g \frac{\dot{\gamma}_h (\gamma_h)^\nu}{\left(\sum_{k=1}^N \dot{\gamma}_k \right)^\delta}, \\ \boldsymbol{\omega} = \dot{\mathbf{k}}_i \mathbf{k}_i. \end{array} \right. \quad (1.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \boldsymbol{\Sigma}^{\text{cr}} = \dot{\boldsymbol{\Sigma}} - \boldsymbol{\Omega} \cdot \boldsymbol{\Sigma} + \boldsymbol{\Sigma} \cdot \boldsymbol{\Omega} = \boldsymbol{\Pi} : (\mathbf{Z} - \mathbf{Z}^{\text{in}}), \\ \mathbf{Z} = \mathbf{L} - \boldsymbol{\Omega}, \\ \mathbf{Z}^{\text{in}} = \langle \mathbf{z}^{\text{in}} \rangle, \\ \boldsymbol{\Omega} = \langle \boldsymbol{\omega} \rangle, \\ \boldsymbol{\Pi} = \langle \boldsymbol{\Pi} \rangle. \end{array} \right. \quad (1.2)$$

Системы соотношений мезоуровня (1.1) и макроуровня (1.2) согласуются при помощи обобщённой гипотезы Фойгта (1.3):

$$\mathbf{L} = \mathbf{I}. \quad (1.3)$$

В ходе работы был проведен процесс верификации математической модели.

Для решения проблемы получения экспериментальных данных о эволюции микроструктуры материала в ходе процесса изготовления, а также данных о состоянии микроструктуры материала, полученного в ходе процесса изготовления, планируется использование аналогичной двухуровневой математической модели упруговязкопластического деформирования поликристалла для имитации процесса изготовления и получения необходимых данных о микроструктуре для дальнейших исследований.

Задача максимизации предела текучести для заданного класса нагружений нацелена на поиск траектории деформации, позволяющей дополнительно упрочнить материал для данной конструкции. Траектории деформирования полагаются лучевыми, трехмерными, заданной длины, соответствующей 50% интенсивности деформаций. Решение задачи оптимизации реализовано при помощи численного метода оптимизации Нелдера-Мида.

Литература

1. Вишняков Я.Д. Теория образования текстур в металлах и сплавах / Вишняков Я.Д., Бабарэко А.А., Владимиров С.А., Эгиз И.В. Москва: Изд. «Наука», - 1979. – 343 с.
2. Трусов П.В., Нечаева Е.С., Швейкин А.И. Применение несимметричных мер напряженного и деформированного состояния при построении многоуровневых конститутивных моделей материалов // Физ. мезомех. – 2013. – Т. 16. - №2. – С. 15-31.
3. Трусов П.В., Волегов П.С., Янц А.Ю. Двухуровневые модели поликристаллов: приложение к оценке справедливости постулата изотропии Ильюшина в случае больших градиентов перемещений // Физ. мезомех. – 2015. – Т. 18. - №1. – С. 23-37.
4. Трусов П.В., Швейкин А.И., Янц А.Ю. О разложении движения, независимых от выбора системы отчета производных и определяющих соотношениях при больших градиентах перемещений: взгляд с позиций многоуровневого моделирования // Физ. мезомех. – 2016. – Т. 19. - №2. – С. 47-65.

5. Янц А.Ю. Двухуровневая математическая модель для описания неупругого деформирования поликристаллов: приложение к анализу сложного нагружения в случае больших градиентов перемещений: Дис... канд. физ.-мат. наук. – Пермь, 2016. – 149 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ В АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ

Янов Д.В., Пахнутова Н.В.

Научный руководитель — профессор, д.ф.м.н. Зелепугин С.А.
Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск
E-mail: dima.yanov97@mail.ru

Легкие и прочные алюминиевые сплавы занимают лидирующие позиции в аэрокосмической отрасли. Однако применением легирующих добавок не всегда удается получить требуемые характеристики материала. Важное значение также имеет зеренная структура. Данная работа посвящена методу интенсивной пластической деформации (ИПД), с помощью которого можно добиться ультрамелкозернистой структуры (УМЗ) металла. Интерес к методам ИПД определяется тем, что измельчение структуры металла до наноразмеров значительно увеличивает его прочность, усталостную прочность, сопротивление коррозии [1, 2]. Одним из современных методов ИПД является динамическое канально-угловое прессование (ДКУП), в котором вместо пресса для продавливания образца через оснастку (пересечение каналов) используется пороховой заряд. За счет этого увеличивается скорость пластических деформаций и уменьшается число проходов через оснастку для достижения равномерной УМЗ структуры в объеме материала.

Целью работы является определение оптимальных параметров процесса ДКУП образца из алюминиевого сплава АМгЗ. Образец имеет размеры $65 \times 16 \times 16$ мм и расположен в вертикальном канале оснастки на расстоянии 4 мм от горизонтального канала [3]. Стенки оснастки считаются абсолютно жесткими.

Решение задачи проводилось модифицированным методом конечных элементов в трехмерной постановке. В качестве базовых уравнений используются уравнения неразрывности, движения и энергии. Для описания пластического деформирования используется условие текучести Мизеса, модули сдвига и динамический предел текучести зависят от степени повреждения материала и температуры [3].

В результате расчетов было определено оптимальное давление, равное 0.6 ГПа при начальной скорости движения образца 150 м/с. Максимальная температура в образце достигает 650 К. Также в образце из сплава АМгЗ наблюдается равномерное распределение структуры по всей длине, кроме передней и тыльной части.

Литература

1. Зелепугин С.А., Янов Д.В., Бодров А.С., Попов А.А. Повышение прочностных характеристик металлических образцов при динамическом канально-угловом прессовании // Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий: научная сессия НИЯУ МИФИ - 2018, 2-6 апреля 2018 г.: материалы конференции / под ред. М.Д. Носкова. – Северск: Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2018, с. 42.
2. Янов Д.В., Зелепугин С.А. Получение ультрамелкозернистых медных образцов при динамическом канально-угловом прессовании // XVII Всероссийская молодежная научная конференция с элементами научной школы «Функциональные материалы: синтез, свойства, применение», посвященная 110-летию со дня рождения член.-корр. АН СССР Н.А. Торопова. Сборник тезисов. - СПб.: «ЛЕМА», 2018. С. 174-175.
3. Зелепугин С.А., Бодров А.С., Пахнутова Н.В. Диаграмма процесса динамического канально-углового прессования титановых образцов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 2017, № 11-1, с. 28-31.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ДИОДА НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ПЕЛЬТЬЕ

Яценко Е.А.

Научный руководитель – г.н.с., д.ф.-м.н. Соловьев Н.Г.

МАИ, Москва

E-mail: fedya.varanov.99@mail.ru

Введение. Лазерные диоды – современные электронно-оптические приборы, используемые во многих областях науки и техники. Они находят широкое применение в волоконно-оптических системах, металлообработке, измерительном оборудовании, в источниках широкополосного излучения высокой яркости на основе оптических разрядов [1]. Характерной особенностью эксплуатации лазерных диодов является необходимость стабилизации рабочей температуры в диапазоне от 18 до 30 градусов Цельсия, от которой зависит как длина волны лазерного излучения, так и срок службы самого диода.

Методы. Для практического решения этой задачи был выбран термоэлектрический модуль, основанный на эффекте Пельтье [2]. Это явление заключается в том, что при пропускании тока через контакт двух различных веществ (наиболее заметно это выражено в полупроводниках) на месте контакта происходит выделение дополнительного тепла, или же, наоборот, его поглощение, если ток имеет противоположное направление. Причиной возникновения этого эффекта является контактное поле на стыке проводящих веществ, которое препятствует прохождению электронов в одном направлении и содействует в противоположном. В первом случае происходит нагревание, а во втором охлаждение. Таким образом термоэлектрический модуль, состоящий из последовательно соединенных пар полупроводников р- и n- типа с одной стороны нагревается, а с другой охлаждается.

Отметим основные параметры элемента Пельтье, а также зависимости между ними. На рис. 1 изображена зависимость холодильной мощности Q_c от разности температур ΔT между холодной и горячей сторонами модуля при различных значениях тока I в процентах от I_{max} .

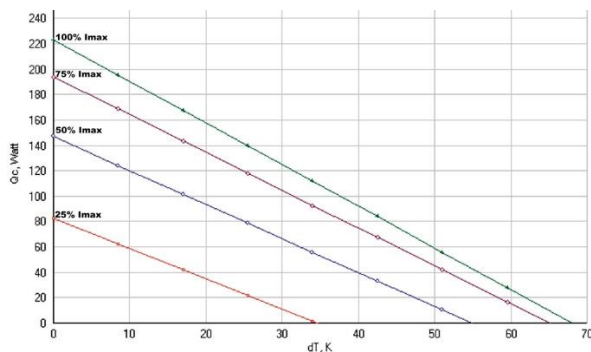


Рис. 1

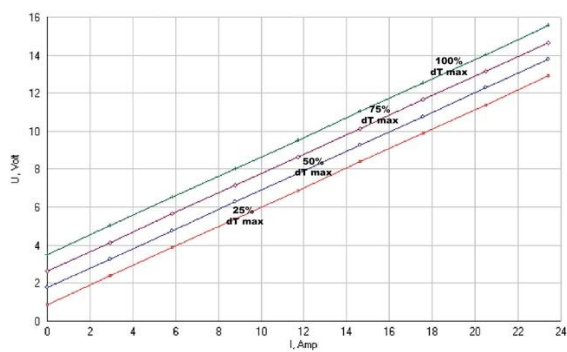


Рис. 2

Из графика следует, что при повышении тока рост холодильной мощности замедляется, так как сам элемент Пельтье начинает интенсивнее вырабатывать тепло. Это тепло приблизительно соответствует произведению тока и напряжения, приложенных к модулю, что следует из графика на рис. 2.

Таким образом влияние на работу элемента Пельтье также оказывают:

- Эффективность отвода тепла от горячей стенки, обусловленная свойствами радиатора и условиями его охлаждения.
- Отвод холодильной мощности лазерным диодом, лишь частично занимающим площадь элемента Пельтье.
- Другие факторы, сопровождающие реальное использование лазерных диодов.

Теоретически исследовать эту зависимость не представляется возможным, так как очень сложно просчитать или измерить многочисленные параметры, необходимые для решения этой нелинейной задачи.

В связи с этим было принято решение создать экспериментальный стенд для исследования элементов Пельтье в реальных условиях с целью оптимизации требуемых характеристик как самого элемента Пельтье, так и системы охлаждения (источников питания, вентиляторов, радиаторов, используемых теплопроводящих и теплоизолирующих материалов).

Экспериментальная часть. Упрощенная схема стенда изображена на рис. 3. Так как лазерный диод достаточно дорогостоящее изделие, при создании стенда использовался эмулятор, полностью воспроизводящий температурные характеристики лазерного диода с возможностью изменения тепловой мощности от 0 до 150 Вт. Эмулятор установлен на холодную сторону термоэлектрического модуля ТВ-127-2.2-0,95 [4] с использованием теплопроводящей пасты. Другая сторона модуля закреплена на медном радиаторе. Радиатор обдувается вентилятором, управление скоростью которого производится с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Для наглядности поступающие импульсы выводятся на осциллограф. Температуры холодной и горячей сторон модуля Пельтье измеряются цифровыми датчиками температуры. Используется три независимых источника питания: ИП 20 В для питания лазерного диода, ИП, регулируемый по току и напряжению для элемента Пельтье и ИП 12 В для питания вентилятора, генератора импульсов и датчиков температуры.

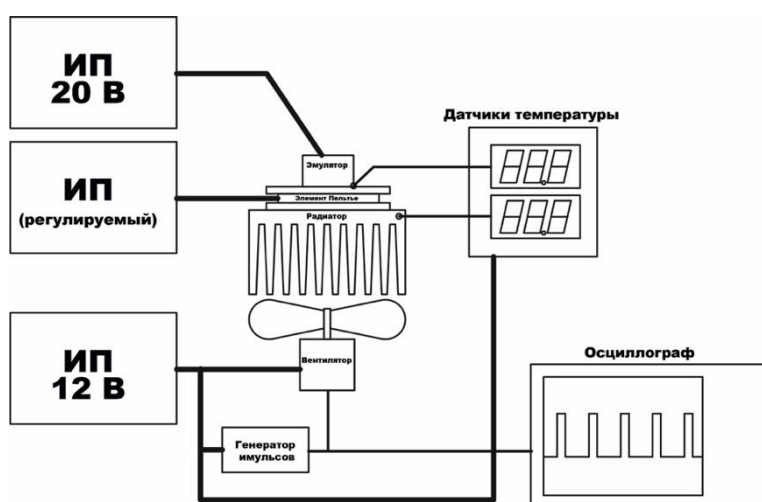


Рис. 3

Отдельно стоит рассмотреть схему эмулятора, приведенную на рис. 4. [3] Он состоит из транзистора, установленного на теплопроводящей медной пластине, операционного усилителя с обратной связью и нескольких резисторов. Данная схема позволяет стабилизировать ток, протекающий через транзистор и таким образом обеспечить требуемую тепловую мощность, равную произведению тока на напряжение источника питания. Ток задается резистором R_1 .

Регулируемый нагреватель 0-150 Вт.

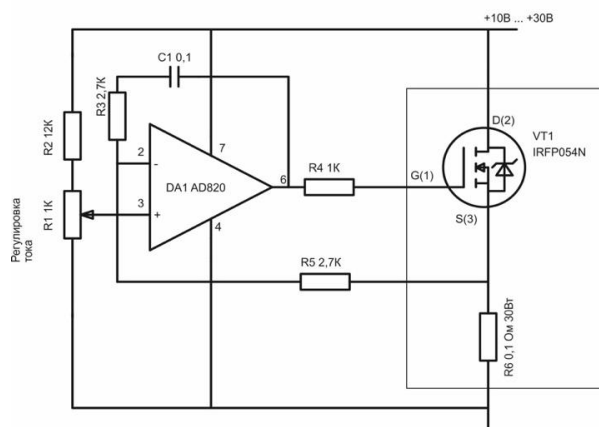


Рис. 4

Лазерные диоды находят применение в самых разных областях жизни человека: в медицине, лабораторных исследованиях, и даже в космосе для осуществления связи и в научных экспериментах. Это разнообразие существенно влияет на способы охлаждения лазерных диодов в зависимости от условий работы. Так, например, на космических станциях высокие требования к надежности оборудования, а расход энергии не очень важен, так как она в достаточном количестве поступает от солнечных элементов. При использовании же в составе бортового оборудования в полевых условиях критическим является потребление прибором электроэнергии. В медицинском оборудовании недопустим высокий уровень шума от охлаждающих вентиляторов. В связи с этим были проведены предварительные эксперименты по следующим направлениям:

- Изменялись параметры тока и напряжения, приложенных к термоэлектрическому модулю, а скорость вращения вентилятора оставалась постоянной. Управление мощностью элемента Пельтье производилось с помощью регулируемого источника питания с параметрами 5-15 В и 5-15 А по напряжению и току соответственно.
- Изменялась частота вращения вентилятора при постоянной мощности на элементе Пельтье. Управление скоростью вентилятора осуществлялось при помощи слаботочного широтно-импульсного модулятора, а модуль Пельтье был присоединен к обычному источнику питания.

В первом случае была выявлена зависимость температуры холодной стороны модуля Пельтье t_1 от его мощности $W_{\text{п}}$, а также подобраны оптимальные значения этих параметров в зависимости от требуемой рабочей температуры (рис. 5).

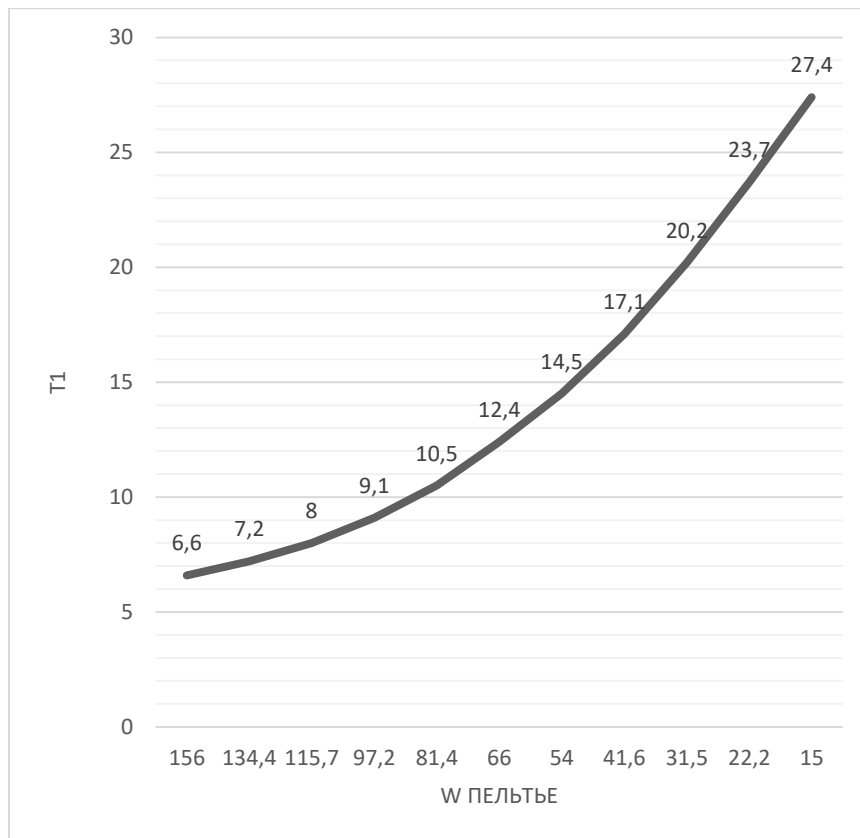


Рис. 5

Во втором случае была получена зависимость температуры холодной стороны t_1 от частоты вращения вентилятора ν (рис. 6).

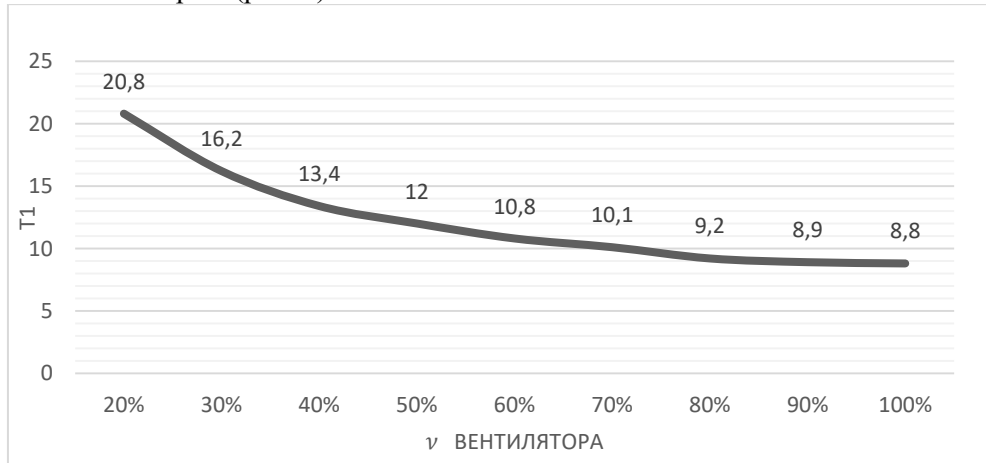


Рис. 6

Выводы. Предварительные эксперименты показали возможность использования для стабилизации температуры лазерного диода с помощью модуля Пельтье как скорости вращения охлаждающего вентилятора при постоянной мощности на модуле, так и мощности, подаваемой на модуль от источника питания при постоянной скорости вращения вентилятора. Управление скоростью вентилятора осуществляется достаточно просто при помощи слаботочного широтно-импульсного модулятора, при этом модуль Пельтье присоединен к обычному источнику питания и потребляет практически постоянную мощность. При постоянной скорости вращения вентилятора требуется управление мощностью модуля Пельтье регулируемым источником питания с параметрами по напряжению в диапазоне 5-15В и току 5-15А.

Полученные экспериментальные данные обладают хорошей повторяемостью, имеют четко выраженные зависимости параметров, позволяющие в ходе дальнейших исследований на этом стенде разработать схему автоматической стабилизации температуры лазерного диода, которая позволит системе быстро реагировать на любые изменения рабочих характеристик самого диода, а также окружающей среды.

Литература:

1. Зимаков В.П., Кузнецов В.А., Лаврентьев С.Ю., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Шилов А.О., Якимов М.Ю. Новые возможности применения оптических разрядов в аэрофизическом эксперименте // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2016. Т.17, вып. 2. <http://chemphys.edu.ru/issues/2016-17-2/articles/653/>.
2. Шостаковский П. Современные решения термоэлектрического охлаждения для радиоэлектронной, медицинской, промышленной и бытовой техники // Силовая электроника. 2010. №1, стр. 130-137.
3. Хоровиц П., Уилл У. Искусство схемотехники. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS. 1981.
4. <http://kryothermtec.com/assets/dir2atz/a.pdf>

Авторский указатель

- Son JINWOO, 168
Абалихина О.В., 65, 95
Абрикосова Т.М., 6
Авершьева А.В., 8
Агеев Е.В., 122, 146
Астапов Ю.В., 10
Ахунова А.Х., 23, 40, 81
Бабарыкин В.А., 11
Баймова Ю.А., 92, 144, 150
Байкова Е.И., 44
Барсегян О.С., 14
Баршай А.М., 16
Башкатова М.Ш., 17
Баяндин С.Р., 18
Безухов К.А., 21
Беклемишев Н.Н., 84, 176
Бикмухаметова А.А., 23
Билалов Д.А., 26
Бойцов А.Г., 168
Бураго Н.Г., 51
Буруруев А.М., 29
Валисовский Н.Е., 174
Валитов В.А., 23, 81
Веденкин Н.А., 32
Вельмакин Г.С., 184
Волков М.А., 34
Волокитина И.Е., 37
Гавриков А.Г., 129
Гаджибеков Т.А., 39
Галиева Э.В., 23, 40, 81
Гандилян Д.В., 43
Гафуров У.С., 45
Герасимов Р.М., 48
Герман В.А., 51
Гета О.А., 11
Гордеев И.С., 54
Горденчук В.Д., 55
Городцов В.А., 34, 67
Горячева И.Г., 104
Гулин В.В., 58
Гуркина Е.Д., 61
Давыдов Д.П., 70
Давыдов С.А., 62
Данилушкин В.С., 65
Демин А.И., 67
Десюкевич К.Ю., 70
Добрянский В.Н., 71, 135
Дубинец А.О., 72
Екимовская В.А., 73
Емельянов В.Н., 102
Ерисов Я.А., 139
Ефремов В.А., 76
Жавхлан Саруул, 78
Жигалова М.Ю., 81
Загаровский А.А., 84
Замараева Ю.В., 85
Зверев Н.А., 87
Звонов С.Ю., 182
Зелепугин С.А., 190
Земсков А.В., 45, 62, 87
Зубко И.Ю., 124
Идрисов Д.М., 88
Инатович Ю.В., 131
Ипполитов А.О., 101
Казанцева А.В., 90
Калашников А.С., 91, 109
Камбаров К., 37
Караванова А. Г., 91
Клопотов А.А., 21
Клявлинка А.И., 92
Ковыдин С.А., 95
Колесников А.Ф., 172, 184
Колотова Л.Н., 54
Короленко В.А., 96
Косарева М.А., 97
Крутиков П.В., 99
Кузнецов С.В., 8, 39, 116
Курган К.А., 21
Лаврентьев С.Ю., 178
Ларин С.Н., 149
Лебедев В.В., 97
Ледовская Ю.С., 100
Лисовенко Д.С., 34, 67, 177
Логинов Ю.Н., 85, 161
Лукин А.В., 100
Лутфуллин Р.Я., 40
Манаенков Д.А., 101
Мирзахамдамов О.М., 102
Мифтахова А.Р., 104
Михрютин А.В., 105
Михрютин В.В., 105
Моргунова А.А., 107
Мотырева Т.А., 131
Мурашкин Е.В., 113
Мусаров В.Е., 109
Набережнев П.А., 16
Нестеров Т.К., 113
Низамаев Т. М., 116
Никитин А.Д., 16, 58, 72
Никитин В.А., 32
Никитин И.С., 11, 17, 76, 183
Никифоров А.С., 119
Новиков Е.П., 122
Окатыев Р.С., 124

Панфилов Г.В., 134
Паршин Д.А., 126
Пахнурова Н.В., 190
Петров И.Н., 139
Петухов Ю.В., 6
Полянская Л.В., 129
Попов А.Л., 29
Постыляков А.Ю., 131
Поцелуев К.О., 134
Прокудин О.А., 135
Прохоров Е.С., 136
Прохорчук К.В., 76
Рабинский Л.Н., 107
Разживин В.А., 139
Романов К.А., 141
Ручинский В.С., 170
Рысаева Л.Х., 92, 144
Сабельников Б.Н., 146
Самсонов Н. А., 99, 149
Сафина Л.Р., 150
Сафронов А.В., 153
Скворцова А.А., 156
Слугина Д.И., 170
Снегирев И.В., 161
Соколов А.С., 164
Соломонов К.Н., 166
Соломонова А.К., 166
Соляев Ю.О., 71, 96, 135
Степанов Ф.И., 169

Стратула Б.А., 183
Сурудин С.В., 139
Счастливец В.В., 6
Сычев А.С., 171
Тептеева Е.С., 172
Терауд В.В., 174
Терещенко П.А., 176
Типалин С.А., 101
Тищук Л.И., 166
Ткаченко В.Г., 177
Трусов П.В., 164
Устинов К.Б., 43
Фадеев Е.П., 178
Федичев Д.К., 159
Фисенкова Д.В., 61
Фомин В.М., 179
Халикова А.А., 182
Ченцов А.В., 44, 171, 178
Шаталин А.А., 61
Швейкин А.И., 141
Шипунов В.В., 70
Щёлоков С.Л., 184
Ягудин Т.Г., 61
Яковенко А.А., 169
Яковлев А.Ю., 187
Янов Д.В., 190
Янц А.Ю., 187
Яценко Е.А., 191

**МЕЖДУНАРОДНАЯ МОЛОДЁЖНАЯ НАУЧНАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ
«XLV ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ»**

СЕКЦИЯ

*Механика и моделирование
материалов и технологий*

СБОРНИК ТРУДОВ

ISBN 978-5-91741-244-3



Подписано к печати 08.04.19

Заказ № 5 -2019

Тираж 50 экз.

Отпечатано на ризографе
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского
Российской академии наук
119526, Москва, пр-кт Вернадского, д.101-1

