

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Российская академия наук

Российский национальный комитет
по теоретической и прикладной механике

ХІІІ ВСЕРОССИЙСКИЙ СЪЕЗД ПО ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКЕ

Сборник тезисов докладов в 4 томах

21–25 августа 2023 года
Санкт-Петербург

Т о м 3

МЕХАНИКА
ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА



ПОЛИТЕХ-ПРЕСС

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Санкт-Петербург
2023

УДК 531/534
ББК 22.2
В85

ХIII Всероссийский Съезд по теоретической и прикладной механике : сборник тезисов докладов в 4 томах, 21–25 августа, 2023 г., Санкт-Петербург. Т. 3. Механика деформируемого твердого тела. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – 1282 с.

Том 3 содержит расширенные тезисы пленарных докладов Съезда, устных и стендовых докладов секции III.

ISBN 978-5-7422-8282-2 (т. 3)
ISBN 978-5-7422-8279-2
doi:10.18720/SPBPU/2/id23-629

© Российская академия наук, 2023
© Российский национальный комитет
по теоретической и прикладной механике, 2023
© Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, 2023

ОРГАНИЗАТОРЫ СЪЕЗДА

Российский национальный комитет по теоретической и прикладной механике
Российская академия наук

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ

Министерства науки и высшего образования Российской Федерации
Правительства Санкт-Петербурга
Санкт-Петербургского государственного бюджетного учреждения
«Конгрессно-выставочное бюро»

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ПАРТНЕР

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого»

ПАРТНЕРЫ

ПАО «Газпром нефть»
МГУ
СПбГУ
ИПМаш РАН
ФАУ «Центральный аэрогидродинамический институт
имени профессора Н.Е. Жуковского»
ООО «АСКОН-Системы проектирования» (Консорциум «Развитие»)

СПОНСОРЫ

АО «НПО Спецматериалов»
АО «Институт новых углеродных материалов и технологий»
ООО «ФИДЕСИС»
ООО «ФИАНУМ ЛАБ»

ОРГКОМИТЕТ

Горячева Ирина Георгиевна, Рудской Андрей Иванович – сопредседатели
Боровков Алексей Иванович, Кривцов Антон Мирославович – заместители председателя
Арсеньев Дмитрий Германович, Бабешко Владимир Андреевич, Беляев Александр Константинович, Гайфуллин Александр Марксович, Гильманова Асия Тагировна, Губайдуллин Дамир Анварович, Карев Владимир Иосифович, Климов Дмитрий Михайлович, Козлов Валерий Васильевич, Корнеев Сергей Евгеньевич, Левин Владимир Алексеевич, Матвеев Валерий Павлович, Морозов Никита Федорович, Мулюков Радик Рафикович, Нигматуллин Роберт Искандерович, Пешехонов Владимир Григорьевич, Полянский Владимир Анатольевич, Сергеев Виталий Владимирович, Сильников Михаил Владимирович, Суржиков Сергей Тимофеевич, Сыпало Кирилл Иванович, Федоров Михаил Петрович, Фомин Василий Михайлович, Черноусько Феликс Леонидович, Чернышев Сергей Леонидович, Хасанов Марс Магнавиевич, Хомич Владислав Юрьевич, Шмотин Юрий Николаевич

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Горячева Ирина Георгиевна – председатель
Кривцов Антон Мирославович – заместитель Председателя
Кузькин Виталий Андреевич – ученый секретарь
Аннин Б.Д., Афанасьев А.А., Бабешко В.А., Бауэр С.М., Беляев А.К., Васильев В.В., Ганиев Р.Ф., Гайфуллин А.М., Губайдуллин Д.А., Ерофеев В.И., Журавлев В.Ф., Индейцев Д.А., Карев В.И., Климов Д.М., Куликовский А.Г., Козлов В.В., Левин В.А., Ломакин Е.В., Матвеев В.П., Морозов Н.Ф., Мулюков Р.Р., Нигматуллин Р.И., Павленко А.Н., Петров Ю.В., Порубов А.В., Полянский В.А., Ребров А.К., Решмин С.А., Романов А.Е., Садовский В.М., Сильников М.В., Смирнов Н.Н., Сыпало К.И., Суржиков С.Т., Фомин В.М., Черноусько Ф.Л., Чернышев С.Л., Якуш С.Е.

ЛОКАЛЬНЫЙ ОРГКОМИТЕТ

Княгинин В.Н., Боровков А.И. – сопредседатели
Кривцов А.М. – заместитель председателя
Кузькин В.А. – секретарь
Азаренков С.С., Арсеньев Д.Г., Беляев А.К., Владимиров С.С., Гильманова А.Т., Греков М.А., Иванова В.С., Карпов Д.А., Корнеев С.Е., Кустова Е.В., Максимов А.С., Микушев С.В., Пашоликов М.А., Полянский В.А., Селюгин А.С., Сергеев В.В., Сильников М.В., Соколов А.Ю., Сорокин П.П., Тихонов А.А., Фролов М.Е.

Краткое содержание

СЕКЦИЯ III. Механика деформируемого твердого тела	6
Подсекция III-1. Теория упругости и вязкоупругости, термомеханика деформируемых тел...	37
Подсекция III-2. Теория пластичности и ползучести	222
Подсекция III-3. Динамические процессы в деформируемых средах	331
Подсекция III-4. Механика разрушения и повреждений.....	490
Подсекция III-5. Механика контактного взаимодействия	733
Подсекция III-6. Механика неоднородных сред и композитов, структурная механика	816
Подсекция III-7. Механика дискретных сред, неклассические модели механики сплошных сред	1077
Подсекция III-8. Проблемы оптимизации, идентификации и надежности	1188

СЕКЦИЯ III

Механика деформируемого твердого тела

СЕКЦИЯ III

Подсекция III-3

Динамические процессы в деформируемых средах

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ АНИЗОТРОПНОГО СПЛАВА 1561 (AMГ61) ПРИ ТЕМПЕРАТУРНО-СКОРОСТНОМ РАСТЯЖЕНИИ

Пазылов Ш.Т.¹, Китаева Д.А.²

1 - Кыргызско-Российский Славянский университет, Бишкек, Кыргызская Республика

2 - Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

pazylov56sh@mail.ru

Аннотация. Объектом исследования являются закономерности деформационной анизотропии и структурные преобразования текстурированного алюминиевого сплава 1561 (AMГ61). Получено металлографическое обоснование аномальных эффектов, наблюдаемых в процессе высокотемпературного деформирования в широком скоростном диапазоне деформации. Установлены закономерности возникновения и развития деформационной анизотропии, наблюдаемые в определенных температурно-скоростных режимах деформирования исследуемого сплава, при которых проявляется сверхпластичность. Указаны диапазоны формирования оптимальных структур материала и дана оценка степени его применимости в технологических операциях обработки металлов давлением.

Введение

Сверхпластичность промышленных алюминиевых сплавов [1] объясняется динамической рекристаллизацией, происходящей при нагреве и деформации. В процессе последней исходная литая или деформированная структура превращается в равноосную мелкозернистую. Иными словами, находит подтверждение гипотеза о физической природе сверхпластичности как о суперпозиции деформации и одного или нескольких структурных превращений.

Сверхпластическая деформация, осуществляемая в определенных температурно-скоростных условиях, представлена в данном исследовании как термомеханический способ снижения структурной и деформационной анизотропии исходно текстурированного материала.

Величину введенного коэффициента анизотропии предлагается рассматривать в качестве одного из макропараметров материала, характеризующих происходящие структурные преобразования и позволяющих количественно оценить степень и полноту структурных изменений относительно исходного состояния в меняющемся поле температур и скоростей деформации [2].

Постановка задачи эксперимента

Температурно-скоростным испытаниям предшествовали статические испытания на сжатие и растяжение образцов исследуемого сплава 1561 с целью установления основных прочностных и деформационных параметров, характера деформации в условиях нормальной температуры [1]. Указанные испытания проведены на универсальной машине гидравлического типа ZD-40.

Для проведения испытаний образцов на растяжение при повышенных температурах (533-773) К и различных скоростях деформирования ($V_3 = 0,36 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$; $V_4 = 0,143 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$; $V_5 = 0,057 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$; $V_6 = 0,023 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$; $V_7 = 0,009 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$) использовалась испытательная машина ZST 2/3 [1], предназначенная для исследований высокотемпературной ползучести.

Заготовки гагаринских образцов нарезались в направлении прокатки из деформированного листа сплава марки 1561 толщиной 10^{-2} м , полученного путем многоступенчатой продольной прокатки по стандартной технологии [3].

Химический состав материала листа: 5,88% Mg; 1,03% Mn; 0,16 Zr; 0,12% Si; 0,08% Fe, остальное – Al.

Постановка задачи эксперимента заключалась в исследовании состояния материала в форме зависимости [1]

$$\sigma = \sigma(\dot{\epsilon}, \bar{\epsilon}, \theta), \quad (1)$$

где σ – действительное напряжение, θ – температура, $\bar{\epsilon}$ – логарифмическая деформация, $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации.

Результаты механического эксперимента

В ходе экспериментов было установлено [2, 4], что первоначально кругового сечения образцы после испытаний приобретали эллипсообразную форму (рис.1). Заметно отличающиеся между собой размеры большой и малой осей сечения, совпадающих соответственно с плоскостью и толщиной пластины, свидетельствовали о наличии анизотропии деформационных свойств материала. В этом случае можно утверждать, что имеет место анизотропия пластической деформации, или анизотропия пластической деформативности материала в указанных поперечных направлениях растягиваемых образцов. Так как

проявление анизотропии пластической деформации во взаимно перпендикулярных поперечных направлениях растягиваемых образцов является следствием предварительной деформации (прокатки) исходного материала, то обнаруженную анизотропию можно назвать, согласно принятым в механике анизотропных материалов термином [5, 6], деформационной или вторичной анизотропией.

Причиной полученной анизотропии пластической деформации в данном случае является структурная неоднородность, а точнее, сильная ориентированная текстура (полосчатая структура) материала, сформировавшаяся в процессе промышленного изготовления прокатанного листа.

Для характеристики изменчивости формы поперечного сечения в [2, 4] введен коэффициент анизотропии ψ , представляющий собой отношение деформаций, измеренных по малой (ε'') и большой (ε') осям сечения

$$\psi = \varepsilon'' / \varepsilon', \quad \psi \geq 1. \quad (2)$$

Структурные исследования

Для реализации количественного анализа структуры применены цифровой микроскоп «Альтами» и программный продукт «ImageJ».

Были исследованы микрошлифы алюминиевого сплава 1561, полученные из образцов в недеформированном исходном состоянии и после испытаний на растяжение при следующих температурах и скоростях деформации: 420 °C, V_2 ; 420 °C, V_3 ; 480 °C, V_2 ; 480 °C, V_3 ; 500 °C, V_2 ; 500 °C, V_3 ; 300 °C, V_2 ; 300 °C, V_3 . При этом количество зерен в единице рассматриваемого поля колеблется от 1886 до 3553 структурных единиц. Их максимальные и минимальные размеры находятся в диапазоне от 0,04 мкм до 856,520 мкм. Количественная мера структурных единиц при реализованных в экспериментах температурах 300 °C и 480 °C увеличивается до максимального значения 3553, т.е. формируется мелкозернистая структура, а при 420 °C наоборот – уменьшается до значения 1886, следовательно, формируется крупнозернистая структура.

В результате микроструктурного анализа получены результаты [7], свидетельствующие о зависимости коэффициента анизотропии от структуры сплава. Установлено изменение структурного состояния материала (сплава) в зависимости от термомеханических условий деформирования, заключающееся в преобразовании структуры и формировании равноосных, близких к мелкозернистому состоянию, зерен, которое через изменение показателя анизотропии находит отражение в соответствующих графиках.

При установлении достаточно строгого соответствия между значениями показателей анизотропии и количественным параметром, отражающим размер размельчения зерен, данный показатель (анизотропии) предложено рассматривать в качестве одного из макромеханических параметров, позволяющего количественно оценить степень и полноту структурных преобразований относительно исходного состояния.

Заключение

Получена закономерность изменения деформационной анизотропии пластической деформации в зависимости от термомеханических условий деформирования, характеризующая особенности деформационного поведения и отражающая структурные преобразования изначально сильно текстурированного листового материала.

Тенденция преобразования структуры в зависимости от термомеханических условий деформирования и установленные закономерности изменения деформационной анизотропии хорошо коррелируется между собой. Этим подтверждается, что изменение показателя анизотропии является следствием преобразования структуры материала и формирования равноосных зерен, когда создается структурная ситуация для протекания изотропной пластической деформации с минимальным значением показателя анизотропии. Исходя из имеющихся макромеханических экспериментов, такое поведение связывается с эффектом сверхпластичности рассматриваемого сплава 1561. При этом деформирование в условиях сверхпластичности можно считать одним из термомеханических способов уменьшения структурной и деформационной анизотропии исходно-текстурированного материала.

Изучение влияния термомеханических условий деформирования на поведение коэффициента анизотропии и изменение структуры сплава позволяет подбирать режимы для изготовления деталей из листового материала с улучшенной структурой.

Литература

1. А. И. Рудской, Я. И. Рудаев // Механика динамической сверхпластичности алюминиевых сплавов. 2009. 217 с.
2. Ш. Т. Пазылов, Н. А. Оморев, Я. И. Рудаев // Вестник Тамбовского университета. 2010. 15/3. 974-975.
3. Н. Н. Барахтина, Ю. С. Золотаревский, Я. И. Рудаев и др. // Вопросы материаловедения. 1992. 19/20. 72–79.
4. Д. А. Китаева, Ш. Т. Пазылов, Я. И. Рудаев // Прикладная механика и техническая физика, 2016. 57-2. 182-189.
5. Е. К. Ашкенази // Анизотропия машиностроительных материалов. 1969. 220 с.
6. П. Г. Микляев, А. Б. Фридман // Анизотропия механических свойств металлов. 1986. 223 с.
7. G. E. Kodzhaspurov, D. A. Kitaeva, Sh. T. Pazylov, Ya. I. Rudaev // Materials Physics and Mechanics. 2018. 38. 69-75.