

# **ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В95 В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ\***

*А.Ю. ЛАРИЧКИН<sup>1,2</sup>, канд. физ.-мат. наук, науч. сотр., ассистент*

*К.В. ЗАХАРЧЕНКО<sup>1,3</sup>, аспирант, м.н.с., ассистент*

*Б.В. ГОРЕВ<sup>1</sup>, доктор техн. наук, вед. науч. сотр.*

*В.И. КАПУСТИН<sup>3</sup>, канд. тех. наук, доцент*

*(<sup>1</sup>Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева  
СО РАН, г. Новосибирск,*

*<sup>2</sup>НГУ, г. Новосибирск,*

*<sup>3</sup>НГТУ, г. Новосибирск)*

Поступила 9 ноября 2015

Рецензирование 11 января 2016

Принята к печати 11 февраля 2016

**Ларичкин А.Ю.** – 630090, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15,  
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,  
e-mail: larichking@gmail.com

Выполнено моделирование технологического процесса формообразования панели заданной геометрии из сплава В95очТ2, включающего в себя пластическое деформирование в диапазоне скоростей от  $10^{-5}$  до  $10^{-2}$  с<sup>-1</sup> при нормальной (20 °С) температуре, температуре искусственного старения (165 °С) и при температуре отжига (420 °С) с последующей термообработкой по режиму Т2 в соответствии с производственной инструкцией ПИ 1.2.699–2007. Экспериментально установлено влияние параметров процесса (температуры и скорости деформирования) на усталостную долговечность. Показано, что для сплава В95очТ2 сопротивление усталостному разрушению не уменьшается после предварительного деформирования при температуре отжига.

**Ключевые слова:** технология формообразования, скорость деформирования, температура, ползучесть, долговечность.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-6-15

## **Введение**

К прочностным и весовым характеристикам элементов конструкций современных летательных аппаратов предъявляют высокие требования, которые достигаются внедрением новых алюминиевых сплавов и технологий их обработки при создании готового изделия [1, 2, 3]. Одним из широко используемых деформируемых, высокопрочных алюминиевых сплавов является

В95 [4, 5], из которого изготавливают несущие элементы фюзеляжа, центроплана и крыльев ряда самолетов, в том числе и для континентального лайнера Сухой SuperJet SSJ 100.

В связи с усовершенствованием форм летательных аппаратов стали востребованными методы формовки поверхностей сложной геометрии из прямоугольных монолитных плит при повышенных температурах. По сравнению с изготовлением элементов сборных конструкций

\* Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ: № 13-01-0048, 14-08-31352, 15-01-07631, 16-08-00483.

такие методы формовки позволяют сохранить ресурс, уменьшить вес, избавиться от сборочных и подгоночных работ на стадии изготовления изделия. Технологии формовки крупногабаритных элементов конструкций, позволяющие за один технологический шаг совместить процессы релаксации и термической обработки материала изделия, применяются на отечественных авиационных заводах, в том числе НАЗ им. В.П. Чкалова [6].

В большинстве случаев технология изготовления элементов авиационных конструкций включает в себя операции формообразования в ненагретом состоянии, при которых материал испытывает воздействие ударных нагрузок, что способствует появлению в изделии недопустимо больших остаточных напряжений и трещин, которые приводят к ухудшению усталостных характеристик и снижению ресурса конструкции в целом.

В работе [7] исследовано влияние на механические свойства алюминиевого сплава 7075 (Al-Zn-Mg-Cu) высоких скоростей деформирования (от  $1,3 \cdot 10^3$  до  $3,1 \cdot 10^3$  с<sup>-1</sup>) в диапазоне температур от 25 до 300 °С. Сплав 7075 является зарубежным аналогом В95. Авторами проводилось сравнение свойств состаренных образцов и образцов в состоянии поставки. Показано, что скорость деформации и температура существенно влияют на эволюцию микроструктуры и морфологию зерна. Средний размер зерна после ударной деформации может быть выражен отношением Холла-Петча.

В статье [8] рассмотрено изменение динамического размягчения сплава 7075 в зависимости от температуры (250, 300, 350, 400 и 450 °С) и скоростей деформирования (0,01; 0,1; 1 и 10 с<sup>-1</sup>) при сжатии. Показано, что изменение температуры существенно влияет на скорость динамического размягчения. Получена зависимость напряжения от значений деформации, скорости деформации и температуры.

В работе [9] показано, что механизмом деформации для одноосных испытаний образцов из сплава 7075 при 300 и 350 °С являются скольжения по границам зерен, а также, что оптимальной скоростью сверхпластической деформации является  $3 \cdot 10^{-1} \dots 10^{-2}$  с<sup>-1</sup>. Граничная разориентация зерен и постоянность температуры являются двумя основными факторами, которые вносят вклад в высокие удлинения на разрыв.

Работа [10] посвящена экспериментальному исследованию образцов из сплава 7075 в состоянии поставки и в кованом состоянии при температурах (от 250 до 450 °С) и скоростях деформации (от 0,002 до 2 с<sup>-1</sup>). Измерялась анизотропия материала при комнатной температуре для кованых образцов. Однородность и структуру материала оценивали с помощью измерения твердости по Виккерсу и оптической микроскопии. Одним из результатов работы стал факт слабой выраженности деформационной анизотропии материала во время испытаний при повышенных температурах по сравнению с существенным ее проявлением при холодной деформации.

В основе технологии формообразования конструкций лежит решение обратной задачи неупругого деформирования тела в условиях ползучести с последующим упругим распрямлением. Суть задачи заключается в определении такого усилия и формы оснастки для формования заготовки, которое обеспечит заданную кривизну изделия после снятия нагрузки. Математический аппарат для решения подобных задач приведен в работе [11]. Сложность решения этих задач связана как с существенной анизотропией свойств ползучести материала заготовки, так и с учетом разнсопротивляемости материала растяжению и сжатию. Современные подходы к решению ряда задач ползучести изложены в работах [12, 13].

В статье [14] показано численное решение задачи формования элемента конструкции двойной кривизны в условиях ползучести с учетом разнсопротивляемости материала растяжению и сжатию. В противном случае это может привести к различию между расчетными прогибами конструкции и прогибами, наблюдаемыми в эксперименте. В работе [15] дано решение задачи кручения пластины постоянным моментом с учетом анизотропии свойств материала, в которой отмечено, что наименее сопротивляющимся ползучести в анизотропной плите является направление под углом 45° к ее нормали.

Ответ на вопрос о влиянии характеристик технологического процесса: скорости и температуры формообразования заготовки на усталостную долговечность отформованных конструкций являются актуальными для современной авиастроительной отрасли производства. Выбор параметров формообразования связан с требова-

ниями к конечным физико-механическим свойствам материала. В настоящей работе авторами установлены зависимости влияния скорости и температуры предварительного деформирования на усталостную долговечность сплава В95, который является базовым конструкционным материалом для силовых деталей планера современных самолетов и вертолетов.

Физическое моделирование заключалось в воссоздании на лабораторных образцах из сплава В95 условий технологического процесса формообразования, который реализуется при изготовлении панелей сложной геометрии из изначально прямой плиты на установке УФП-1М [6]. Параметры процесса, при которых проводилась предварительная деформация образцов: в каждой области температур  $T = 20, 165, 420$  °С изменялась скорость деформирования от  $10^{-5}$  до  $10^{-2}$  с $^{-1}$ . Обработанные таким способом плоские образцы были испытаны на циклическую долговечность.

## 1. Методика экспериментального исследования

### 1.1. Определение параметров материала и подготовка образцов

Было подготовлено три серии образцов. Образцы вырезались из сплава В95счТ2, плита толщиной  $h = 15$  мм. Целевая толщина заготовки 4 мм достигалась ее фрезерованием путем очередного снятия слоев с двух сторон. Чистота поверхности полученных образцов составляла Ra 0,32 (среднеквадратическое отклонение микронеровностей определялось по ГОСТ 2789–73). Образцы вырезались из плиты в двух ортогональных направлениях – вдоль и поперек проката. Образцы имеют прямоугольное поперечное сечение, значение которых приведено в табл. 1.

Образцы подвергались одноосному растяжению при различных скоростях деформирования в изотермических условиях. Испытания прово-

Таблица 1

**Размеры образцов из сплава В95счТ2 и параметры их предварительного деформирования при температурах  $T = 20, 165, 420$  °С**

Номер	Направление относительно проката	$a_0$ , мм	$b_0$ , мм	$\dot{\epsilon}$ , с $^{-1}$	$E$ , ГПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\sigma_2$ МПа
Серия I ( $T = 20$ °С)							
1	Вдоль	3,66	9,61	0,01	107,0	510	535,9
8	Вдоль	3,97	9,92	0,01	107,0	458	495,2
2	Поперек	3,93	9,61	0,01	107,0	499	534
Серия II ( $T = 165$ °С)							
1*	Вдоль	3,86	9,92	0,01	107,0	403	399,8
2*	Вдоль	3,93	9,89	0,0001	103,0	382	381,4
3*	Вдоль	3,97	9,93	0,001	106,0	414	412,7
3	Вдоль	4,04	9,97	0,0001	94,9	375	373,3
7	Вдоль	3,97	9,92	0,01	71,6	440	440,9
13	Вдоль	4,03	10,00	0,0001	63,0	374	373,5
14	Вдоль	4,03	10,24	0,001	65,7	391	389,5
15	Вдоль	4,03	9,96	0,000002	51,7	293	268,4
4	Поперек	4,03	9,69	0,0001	92,2	373	371,1
6	Поперек	3,98	9,96	0,01	74,0	246	349,9
9	Поперек	3,95	9,95	0,01	68,0	318	324,2
11	Поперек	4,08	10,00	0,0001	66,2	440	385,6
12	Поперек	3,81	9,96	0,001	71,4	398	393,6
Серия III ( $T = 420$ °С)							
1	Вдоль	3,99	9,87	0,01	25,6	53,95	51,35
2	Вдоль	4,00	9,94	0,0001	15,4	17,97	17,13
3	Вдоль	3,98	9,94	0,00001	9,7	11,48	10,75

Номер	Направление относительно проката	$a_0$ , мм	$b_0$ , мм	$\dot{\varepsilon}$ , с <sup>-1</sup>	$E$ , ГПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\sigma_2$ МПа
4	Вдоль	3,99	9,93	0,01	23,0	42,84	38,56
5	Вдоль	4,00	9,95	0,0001	13,5	15,74	16,33
6	Вдоль	3,99	9,94	0,00001	10,4	11,28	10,90
7	Вдоль	3,97	9,93	0,01	18,6	45,17	40,34
8	Вдоль	3,99	9,93	0,0001	12,0	16,81	16,75
9	Вдоль	3,97	9,91	0,00001	10,7	11,76	11,14

В таблице:  $a_0$ ,  $b_0$  – толщина и ширина рабочей части образцов соответственно;  $\dot{\varepsilon}$  – скорость деформирования;  $E$  – модуль упругости;  $\sigma_{0,2}$  – значение напряжения при деформации 0,2 %;  $\sigma_2$  – значение напряжения при деформации 2 %.

дильсь на установке Zwick/Roell Z100 (максимальное усилие 100 кН, чувствительность датчика усилия 0,01 Н) с использованием круглой трехзонной высокотемпературной печи Mytec (до 1100 °С). Нагрев до целевой температуры осуществлялся в течение 30 мин. Измерение деформаций выполнялось штатным экстензометром на базе 50 мм.

Образец помещали в печь, закрепляли в захватах установки и нагревали до целевой температуры. В программе установки задавалась скорость движения траверсы для каждого образца. Окончанием испытания было условие достижения деформации растяжения 2 %. В табл. 1 даны геометрические размеры образцов, скорости их деформирования и значения механических параметров материала для каждого из них:

1) серия I – образцы, подвергнутые предварительной полной деформации  $\varepsilon = 2\%$  при  $T = 20\text{ °C}$ ;

2) серия II – образцы, подвергнутые предварительной полной деформации  $\varepsilon = 2\%$  при  $T = 165\text{ °C}$ ;

3) серия III – образцы, подвергнутые предварительной полной деформации  $\varepsilon = 2\%$  при  $T = 420\text{ °C}$ .

После предварительного деформирования образцы проходили термообработку: выдержка при  $T = 470\text{ °C}$ , закалка в воду и искусственное старение по режиму T2 в соответствии с ПИ 1.2.699–2007.

## 1.2. Испытания на усталость

Испытания на циклическую долговечность подготовленных вышеописанным способом образцов осуществлялись при

$T = 20\text{ °C}$  на сервогидравлической машине Instron 8801. Для измерения приращения компонентов тензора полных деформаций использовались экстензометры: № W-E-404-f «Transverse/Diametral Extensometer» – в продольном и № 2620-601 «Dynamic Extensometer» – в поперечном направлениях.

Образцы испытывали при регулярном нагружении с частотой циклов 10 Гц. Цикл напряжений отнулевой. Максимальное напряжение цикла для каждого образца составляло 250 МПа. Напряжения для усталостных испытаний определяли при помощи параметрической диаграммы деформирования (рис. 1), описанной в работе [16].

Диаграмма деформирования, представленная на рис. 1, получена при отнулевом цикле нагружения и построена в координатах  $\varepsilon_{y \max}$  от  $\sigma_{x \max}$ , где  $\varepsilon_{y \max}$  – максимальные поперечные деформации, соответствующие  $\sigma_{x \max}$  – максимальному напряжению в цикле.

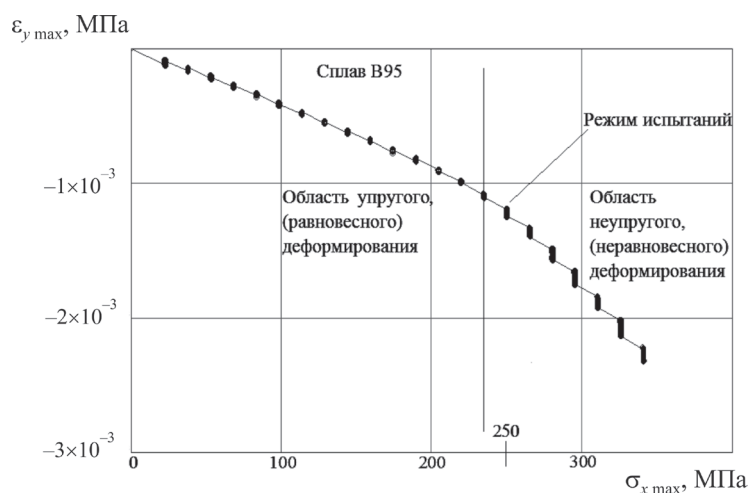


Рис. 1. Диаграмма периодического деформирования образца сплава В95 при ступенчатом увеличении нагрузки



Диаграмма позволяет найти область перехода от упругого к неупругому (неравновесному) деформированию и определить характеристики цикла напряжений при усталостных испытаниях. Из рис. 1 видно, что максимальные напряжения цикла 250 МПа соответствуют первой ступени, при которой в материале активизируются диссипативные процессы при периодическом нагружении. Современные результаты исследований по образованию микро- и макротрещин в конструкциях из алюминиевых сплавов при усталостных режимах нагружения приведены в работе [17].

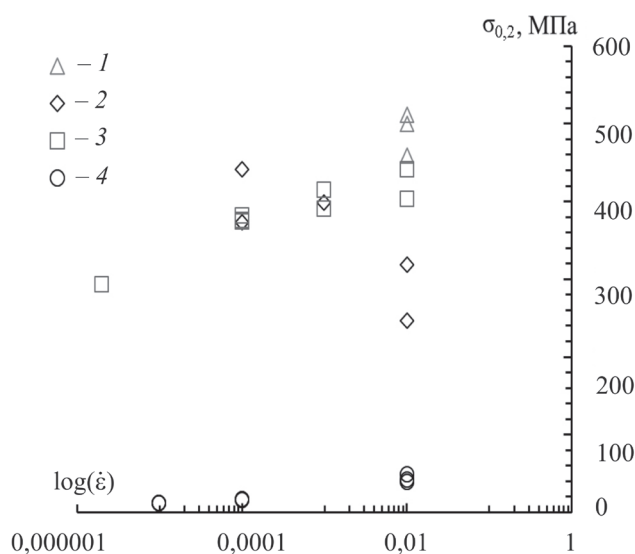


Рис. 2. Зависимость  $\sigma_{0,2}$  от скорости деформирования и направления проката заготовок:

1 – серия I – образцы, вырезанные вдоль и поперек проката; 2 – серия II – поперек проката; 3 – серия II – вдоль проката; 4 – серия III – вдоль проката

## 2. Результаты экспериментов

На рис. 2 показана зависимость  $\sigma_{0,2}$  от логарифма скорости деформаций для каждой серии испытаний. Из графиков видно, что в случае повышенных температур имеется тенденция к росту значения  $\sigma_{0,2}$  для образцов, вырезанных вдоль проката при увеличении скорости деформаций, а также наблюдается тенденция к уменьшению значения  $\sigma_{0,2}$  для поперечных образцов при увеличении скорости деформации.

В сериях испытаний I и II после достижения целевого значения деформации образец разгружался полностью. В серии испытаний III после достижения целевого значения деформации фиксировалось положение траверс машины

и происходил процесс релаксации до момента времени, который указан в регламенте формообразования элементов конструкций из сплава В950чТ2 в отчете Научно-технического центра «Ползучесть» на базе НАЗ им. В.П. Чкалова, г. Новосибирск.

На рис. 3 изображены  $\sigma$ – $\epsilon$  диаграммы образцов серии III. Числами обозначены номера образцов этой серии (см. табл. 1, серия III).

Стоит отметить, что после остановки движения траверс машины по достижении  $\epsilon = 2\%$  до определенного момента времени шел рост деформации при спаде усилия (см. рис. 3). По достижении этого момента деформация начинала уменьшаться. Такое запаздывание можно связать с тем, что в момент начала стадии релаксации фиксировалась деформация всего образца, а не базы измерений. Так может проявляться эффект последствия или эффект обратной ползучести материала. Важно отметить, что для элементов конструкций из данного материала, отформованных указанным образом, возможны отклонения от целевых размеров с погрешностью 0,03...0,05 %.

В табл. 2 представлены значения числа циклов до разрушения трех серий образцов.

На рис. 4 представлены зависимости числа циклов до разрушения от скорости предварительной деформации, полученные по данным табл. 2, сгруппированные по сериям испытаний.

На рис. 4 показано, что с уменьшением скорости предварительного деформирования материала при температуре 420 °С (серия III) сопротив-

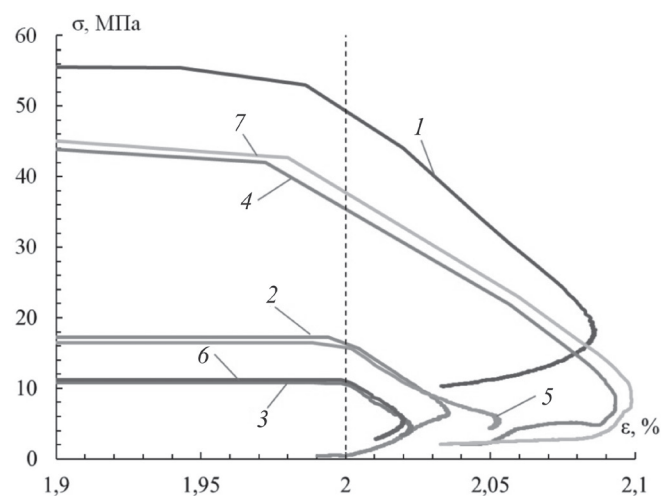


Рис. 3. Рост и уменьшение деформации на базе замеров продольной деформации после остановки траверс машины

Результаты усталостных испытаний трех партий образцов из сплава В950чТ2

Номер образца	$a$ , мм	$b$ , мм	$\dot{\epsilon}$ , $\text{с}^{-1}$	$F_{\max}$ , Н	$N$	Направление
Образцы серии I						
8	3,80	9,70	0,01	9216	50821	Вдоль
4	3,919	9,796	0,001	9597	76236	–
9	3,95	10,0	0,001	9875	105680	–
5	3,916	9,887	0,0001	9679	73935	–
*8	3,70	9,70	0,0001	8972	124578	–
Образцы серии II						
1	3,70	9,75	0,01	9020	95792	Вдоль
2	3,80	9,70	0,01	9216	113727	Вдоль
*7	3,928	9,86	0,01	9681	67414	Вдоль
3	3,70	9,65	0,001	8928	119182	Вдоль
*5	3,85	9,80	0,0001	9432	95538	Вдоль
8	3,9	9,79	0,01	9546	115423	–
7	3,89	9,82	0,01	9550	107777	–
5	3,91	9,79	0,001	9560	37202	–
6	3,877	9,86	0,01	9554	82215	Поперек
9	3,907	9,85	0,01	9624	72884	Поперек
Образцы серии III						
4	3,91	9,89	0,01	9654	86675	Вдоль
7	3,90	9,84	0,01	9594	96655	Вдоль
5	3,90	9,89	0,0001	9643	71982	Вдоль
8	3,91	9,89	0,0001	9667	45854	Вдоль
3	3,90	9,92	0,00001	-	57580	Вдоль
6	3,90	9,90	0,00001	9651	73766	Вдоль
9	3,90	9,87	0,00001	9623	49403	Вдоль

Здесь  $a$  и  $b$  значения поперечных размеров образца после термической обработки;  $\dot{\epsilon}$  – скорость деформации, при которой проходило растяжение образца в состоянии поставки;  $F_{\max}$  – максимальное усилие в цикле;  $N$  – число циклов до разрушения.

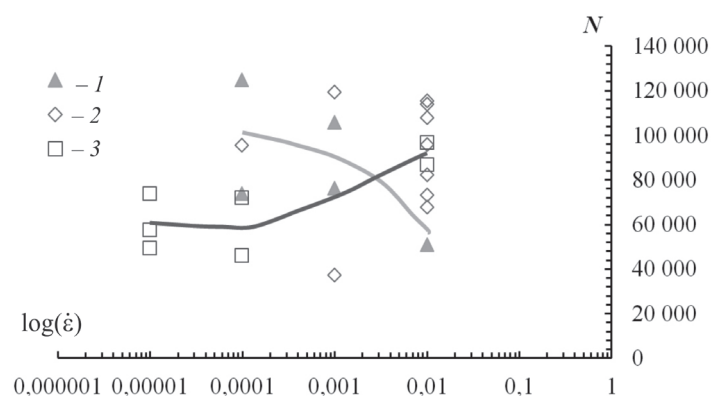


Рис. 4. Зависимость числа циклов до разрушения от скорости предварительной деформации для различных серий испытаний (см. табл. 2):

1 – серия I; 2 – серия II; 3 – серия III

ление усталостному разрушению снижается в 1,5 раза. Отмечено, что циклическая долговечность образцов серии III не уменьшилась по сравнению с образцами серии I для скоростей порядка  $10^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

### 3. Обсуждение

Описанный в работе подход позволяет дать оценку влияния температуры и скорости предварительного деформирования на усталостную долговечность изделий из сплава В950чТ2 на основании экспериментальных методов исследования материалов. Статьи зарубежных авторов, посвященные различным методам деформирования алюминиевого

сплава 7075, который является аналогом сплава В95, не содержат непосредственной информации о влиянии скорости предварительного деформирования на усталостную долговечность. Сопоставимые значения усталостной долговечности при предварительном деформировании в случае нормальной и повышенной температур, а также существенное снижение напряжений при высокотемпературном деформировании показывают принципиальную возможность использования технологий формообразования конструкций из сплава В95 в режимах ползучести для современного самолетостроения.

Представленный в работе подход является перспективным для оценки влияния температуры и скорости деформирования на усталостную долговечность различных типов алюминиевых сплавов.

### Выводы

В работе отражены экспериментальные данные по моделированию технологического процесса получения поверхности двойной кривизны из плиты сплава В95счТ2. Моделирование заключалось в проведении всех ступеней процесса на лабораторных образцах: предварительное деформирование при различных температурах и скоростях деформации (см. табл. 1, рис. 2), а также представлены результаты испытаний готовых образцов на усталостную долговечность (см. табл. 2, рис. 4) после закалки и термической обработки по режиму Т2.

#### Основные выводы

1. Установлена тенденция роста значения  $\sigma_{0.2}$  материала с увеличением скорости деформирования в случае повышенных температур для образцов, вырезанных вдоль проката плиты.

2. Отмечено, что при релаксации образцов из серии III наблюдался эффект последействия (см. рис. 3). Уровень наблюдаемых деформаций показывает необходимость учета этого эффекта в проектировании формообразования крупногабаритных конструкций при повышенных температурах.

3. Показано, что значения усталостной долговечности материала В95счТ2 после предварительного деформирования при температуре старения (165 °С) с последующей термической обработкой становятся выше с уменьшением

скорости предварительного деформирования (см. рис. 4).

4. Экспериментально показано, что при увеличении скорости деформирования в серии III есть тенденция к увеличению числа циклов до разрушения. В серии I имеется тенденция к уменьшению числа циклов до разрушения, что коррелирует с результатами применения метода формования, предложенного в работе [18].

5. Предварительное деформирование образцов из сплава В95счТ2 при температуре отжига (420 °С) и скоростью деформирования  $10^{-2} \text{ с}^{-1}$  с последующей термообработкой по режиму Т2 не уменьшает сопротивление усталостному разрушению (в два раза) по сравнению с образцами, деформируемыми при температуре 20 °С.

Данные выводы позволяют определить оптимальные значения температуры и скорости деформирования для технологического процесса формообразования деталей сложной геометрии, производимых за один технологический цикл. Критерием оптимальности выступает значение высокой усталостной долговечности изделия. Процесс формообразования осуществляется в режиме ползучести, когда совмещены процессы деформирования и термообработки.

### Список литературы

1. Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б., Антипов В.В. Перспективные алюминиевые сплавы для самолетных конструкций // Технология легких сплавов. – 2007. – № 2. – С. 35–38.
2. Aluminum-lithium alloys: processing, properties, and applications / eds.: N.E. Prasad, A. Gokhale, R.J.H. Wanhil. – 1<sup>st</sup> ed. – [S. l.]: Elsevier Publ.: Butterworth-Heinemann, 2013. – 608 p. – ISBN 978-0-12-401698-9.
3. Fundamentals of aluminium metallurgy: production, processing and applications / ed. by R. Lumley. – 1<sup>st</sup> ed. – Oxford: Woodhead Publ., 2011. – 864 p. – ISBN 978-184569-654-2.
4. Фридляндер И.Н. Современные алюминиевые, магниевые сплавы и композиционные материалы на их основе. ВИАМ/2002-203509. – URL: <http://viam.ru/public/files/2002/2002-203509.pdf> (дата обращения: 15.02.2016).
5. ОСТ 1 90026–80. Сплавы алюминиевые деформируемые повышенной чистоты. Марки. – М.: ВИАМ, 1980. – 13 с.
6. Патент 2056197 Российская Федерация, МПК В 21 D 11/20. Способ формообразования деталей и устройство для его осуществления / П.В. Миодушев

ский, Г.А. Раевская, О.В. Соснин. – № 5037750/08; заявл. 15.04.92; опубл. 20.03.96. – 6 с.

7. Effect of aging on high strain rate and high temperature properties of 7075 aluminium alloy / W.S. Lee, W.C. Sue, C.F. Lin, C.J. Wu // *Materials Science and Technology*. – 1999. – Vol. 15, iss. 12. – P. 1379–1386. – doi: 10.1179/026708399101505509.

8. Dynamic softening behaviors of 7075 aluminum alloy / G. Quan, K. Liu, J. Zhou, B. Chen // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2009. – N 19. – P. 537–541.

9. Evolution of the microstructure, texture and creep properties of the 7075 aluminium alloy during hot accumulative roll bonding / P. Hidalgo-Manrique, C.M. Cepeda-Jiménez<sup>1</sup>, A. Orozco-Caballero, O.A. Ruano, F. Carreño // *Materials Science and Engineering: A*. – 2014. – Vol. 606. – P. 434–442. – doi: 10.1016/j.msea.2014.03.105.

10. Naser T.S.B., Krallics G. Mechanical behavior of multiple-forged Al 7075 aluminum alloy // *Acta Polytechnica Hungarica*. – 2014. – Vol. 11, N 7. – P. 103–117. – doi: 10.12700/APH.11.07.2014.07.7.

11. Цвелодуб И.Ю. Постулат устойчивости и его приложения в теории ползучести металлических материалов. – Новосибирск: Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, 1991. – 201 с.

12. Altenbach H., Naumenko K. Modeling of creep for structural analysis. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2007. – 230 p. – ISBN-13 978-3-540-70834-6. – doi: 10.1007/978-3-540-70839-1.

13. From creep damage mechanics to homogenization methods: a Liber Amicorum to celebrate the birthday of Nobutada Ohno / H. Altenbach, T. Matsuda, D. Okumura, eds. – Cham: Springer International Publ., 2015. –

601 p. – ISBN 978-3-319-19439-4. – doi: 10.1007/978-3-319-19440-0.

14. Математическое моделирование процессов ползучести металлических изделий из материалов, имеющих разные свойства при растяжении и сжатии / С.Н. Коробейников, А.И. Олейников, Б.В. Горев, К.С. Бормотин // *Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии*. – 2008. – Т. 9, № 1. – С. 346–365.

15. Банищикова И.А., Цвелодуб И.Ю., Петров Д.М. Деформирование элементов конструкций из сплавов с пониженной сопротивляемостью деформациям ползучести в сдвиговом направлении // *Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико-математические науки*. – 2015. – Т. 157, № 3. – С. 34–41.

16. Захарченко К.В., Капустин В.И. Влияние поверхностных слоев образцов на деформационные характеристики сплава Д16АТ // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2015. – Т. 81, № 7. – С. 51–56.

17. George C. Sih multiscale fatigue crack initiation and propagation of engineering materials: structural integrity and microstructural worthiness. – Dordrecht: Springer Netherlands Publ., 2008. – 371 p. – ISBN-13 978-1-4020-8519-2. – doi: 10.1007/978-1-4020-8520-8.

18. Патент 2396367 Российская Федерация, МПК С 22 F 1/053 (2006.01). Способ получения изделия из высокопрочного алюминиевого сплава / О.Г. Сенаторова, Е.А. Ткаченко, В.В. Сидельников, В.В. Антипов, Н.Е. Блинова, В.В. Шестов, Е.В. Красова. – № 2008141034/02; заявл. 16.10.08; опубл. 10.08.10, Бюл. № 22. – 7 с.

## OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 1 (70), January – March 2016, Pages 6–15

### Experimental modeling of technological process of pure aluminum alloy (Al-Zn-Mg-Cu) structural elements forming under creep

**Larichkin A.Yu.**<sup>1,2</sup>, Ph.D. (Physics and Mathematics), Scientific associate, Assistant, e-mail: larichking@gmail.com

**Zakharchenko K.V.**<sup>1,3</sup>, Ph.D. student, Junior researcher, Assistant, e-mail: zaharchenkok@mail.ru

**Gorev B.V.**<sup>1</sup>, D.Sc. (Engineering), Leading researcher, e-mail: gorevbv@yandex.ru

**Kapustin V.I.**<sup>3</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: macler06@mail.ru

<sup>1</sup>Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the RAS, 15 Ac. Lavrentieva ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

<sup>2</sup>Novosibirsk State University, 2 Pirogova Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

<sup>3</sup>Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation



## Abstract

Due to the improvement of the forms of aircraft, methods of complex surfaces forming using rectangular solid plates and elevated temperatures have become popular. Compared with the production of prefabricated elements, such molding techniques allow saving resources, reducing weight, getting rid of assembly and fitting work on the stage of manufacturing. How different will the fatigue life of pre-deformed at different temperatures and deformation rates products be? The answer to this question is relevant to aerospace industry. A pilot study of the issue is conducted. Fatigue life of pure aluminum alloy (Al-Zn-Mg-Cu), depending on temperature of pre-deformation and strain rate is set.

Experimental modeling of fatigue life of pure aluminum alloy samples is made. Three series of samples previously plastically deformed at different strain rates (1 - at room temperature, 2 – artificial aging temperature and 3 – at the annealing temperature) were used. Plastically deformed samples were heat-treated using the mode T2 in accordance with the production instruction 1.2.699–2007 PI. The effect of the reverse creep at relaxation is shown. This effect should be considered when designing the formation of large structural components at elevated temperatures. The number of cycles to failure at regular loading depends on temperature and deformation rate. Pure aluminum alloy (Al-Zn-Mg-Cu) fatigue resistance does not decrease after a pre-deformation at the annealing temperature.

## Keywords:

processing technique, forming, strain rate, experiment, durability, aluminum alloy, creep, fatigue.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-6-15

## References

1. Kolobnev N.I., Khokhlatova L.B., Antipov V.V. Perspektivnye alyuminiyevye splavy dlya samoletnykh konstruksii [Advanced aluminium-lithium alloys for aircraft structures]. *Tekhnologiya legkikh splavov – Technology of light alloys*, 2007, no. 2, pp. 35–38.
2. Prasad N.E., Gokhale A., Wanhil R.J.H., eds. Aluminum-lithium alloys: processing, properties, and applications. 1<sup>st</sup> ed. Elsevier Publ., Butterworth-Heinemann, 2013. 608 p. ISBN 978-0-12-401698-9
3. Lumley R., ed. Fundamentals of aluminium metallurgy: production, processing and applications. 1<sup>st</sup> ed. Oxford, Woodhead Publ., 2011. 864 p. ISBN 978-184569-654-2
4. Fridlyander I.N. *Sovremennye alyuminiyevye, magniyeve splavy i kompozitsionnye materialy na ikh osnove* [Modern aluminum, magnesium alloys, and composites developed on their base]. VIAM/2002-203509. Available at: <http://viam.ru/public/files/2002/2002-203509.pdf> (accessed 15.02.2016)
5. OST 1 90026–80. *Splavy alyuminiyevye deformiruemye povyshennoi chistoty. Marki* [Industry standard 1 90026–80. Premium aluminium wrought alloys. Grades]. Moscow, VIAM Publ., 1980. 13 p. (In Russian)
6. Miodushevskii P.V., Raevskaya G.A., Sosnin O.V. *Sposob formoobrazovaniya detalei i ustroistvo dlya ego osushchestvleniya* [A method of forming parts and device for its realization]. Patent RF, no. 2056197, 1996.
7. Lee W.S., Sue W.C., Lin C.F., Wu C.J. Effect of aging on high strain rate and high temperature properties of 7075 aluminium alloy. *Materials Science and Technology*, 1999, vol. 15, iss. 12, pp. 1379–1386. doi: 10.1179/026708399101505509
8. Quan G., Liu K., Zhou J., Chen B. Dynamic softening behaviors of 7075 aluminum alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2009, no. 19, pp. 537–541.
9. Hidalgo-Manrique P., Cepeda-Jiménez C.M., Orozco-Caballero A., Ruano O.A., Carreño F. Evolution of the microstructure, texture and creep properties of the 7075 aluminium alloy during hot accumulative roll bonding. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, vol. 606, pp. 434–442. doi: 10.1016/j.msea.2014.03.105
10. Naser T.S.B., Krallics G. Mechanical behavior of multiple-forged Al 7075 aluminum alloy. *Acta Polytechnica Hungarica*, 2014, vol. 11, no. 7, pp. 103–117. doi: 10.12700/APH.11.07.2014.07.7
11. Tselodub I.Yu. *Postulat ustoichivosti i ego prilozheniya v teorii polzuchesti metallicheskich materialov* [The postulate of sustainability and its application to the creep theory of metallic materials]. Novosibirsk, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics Publ., 1991. 201 p.
12. Naumenko K., Altenbach H. *Modeling of creep for structural analysis*. Berlin, Heidelberg, Springer Publ., 2007. 230 p. ISBN 978-3-540-70834-6. doi: 10.1007/978-3-540-70839-1
13. Altenbach H., Matsuda T., Okumura D., eds. *From creep damage mechanics to homogenization methods: a Liber Amicorum to celebrate the birthday of Nobutada Ohno*. Cham, Springer International Publ., 2015. 601 p. ISBN 978-3-319-19439-4. doi: 10.1007/978-3-319-19440-0

14. Korobeinikov S.N., Oleinikov A.I., Gorev B.V., Bormotin K.S. Matematicheskoe modelirovanie protsessov polzuchesti metallicheskih izdelii iz materialov, imeyushchikh raznye svoistva pri rastyazhenii i szhatii [Mathematical simulation of creep processes in metal patterns made of materials with different extension compression properties]. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye: novye vychislitel'nye tekhnologii – Numerical Methods and Programming*, 2008, vol. 9, no. 1, pp. 346–365.

15. Bانشchikova I.A., Tselodub I.Yu., Petrov D.M. Deformirovanie elementov konstruktсии iz splavov s ponizhennoi soprotivlyaemost'yu deformatsiyam polzuchesti v sdvigovom napravlenii. [Deformation of structural elements made of alloys with reduced resistance to creep in shear direction]. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie nauki – Proceedings of Kazan University. Physics and Mathematics Series*, 2015, vol. 157, no. 3, pp. 34–41.

16. Zakharchenko K.V., Kapustin V.I. Vliyanie poverkhnostnykh sloev obraztsov na deformatsionnye kharakteristiki splava D16AT [Comparative analysis of the surface layer effect on the stress-strain characteristics of D16AT Alloy]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Industrial laboratory. Materials diagnostics*, 2015, vol. 81, no. 7, pp. 51–56.

17. Sih G.C., ed. *Multiscale fatigue crack initiation and propagation of engineering materials: structural integrity and microstructural worthiness*. Dordrecht, Springer Netherlands Publ., 2008. 371 p. ISBN-13 978-1-4020-8519-2. doi: 10.1007/978-1-4020-8520-8

18. Senatorova O.G., Tkachenko E.A., Sidel'nikov V.V., Antipov V.V., Blinova N.E., Shestov V.V., Krasova E.V. *Sposob polucheniya izdeliya iz vysokoprochnogo alyuminievogo splava* [Procedure for production of item out of high-strength aluminium alloy]. Patent RF, no. 2396367, 2010.

#### Funding

The reported study was partially supported by RFBR, research projects No. 13-01-0048, 14-08-31352, 15-01-07631, 16-08-00483.

#### Article history:

Received 9 November 2015

Revised 11 January 2016

Accepted 11 February 2016