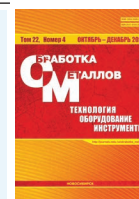




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.ntu.ru/obrabotka_metallov



Влияние технологии горячего формообразования плит из алюминиевых сплавов В-1461 (Al-Cu-Li-Zn) и В95 (Al-Zn-Mg-Cu) на сопротивление усталостному разрушению

Кирилл Захарченко^{1, 2, а, *}, Владимир Капустин^{2, 1, b}, Алексей Ларичкин^{1, 3, c}, Ярослав Лукьянов^{1, d}

¹ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 15, г. Новосибирск, 630090, Россия

² Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

³ Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, ул. Пирогова, 1, г. Новосибирск, 630090, Россия

^а <https://orcid.org/0000-0003-2626-6184>, zaharchenkok@mail.ru, ^б <https://orcid.org/0000-0001-6124-2503>, macler06@mail.ru,

^с <https://orcid.org/0000-0002-7306-9522>, larichking@gmail.com, ^д <https://orcid.org/0000-0003-4526-9399>, lukyanov@hydro.nsc.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 539.389:539.43: 621.77.07

История статьи:

Поступила: 11 августа 2020

Рецензирование: 26 августа 2020

Принята к печати: 14 сентября 2020

Доступно онлайн: 15 декабря 2020

Ключевые слова:

Алюминиево-литиевый сплав
Упругопластическое деформирование
Деформационные характеристики
Ползучесть
Формообразование
Структура
Метод ускоренной оценки сопротивления усталостному разрушению
Метод конечных элементов

Финансирование:

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Новосибирской области в рамках научно-го проекта № 19-48-543028.

Благодарности:

Авторы выражают благодарность ведущему инженеру-технологу филиала ПАО «Компания «Сухой» «НАЗ им. В.П. Чкалова», кандидату технических наук Галине Апсаттаровне Раевской за консультацию в работе.

АННОТАЦИЯ

Введение. Одной из основных задач развития перспективных изделий авиационной техники является снижение веса конструкции летательных аппаратов. Решить эту задачу можно, применяя в конструкции деталей новые материалы из алюминиевых сплавов пониженной плотности, легированных литием, например В-1461. Использование этих материалов в самолетостроении ограничивается технологией обработки, которая не должна повреждать материал и снижать его прочностные свойства. К таким технологиям можно отнести обработку давлением с нагревом, когда активизируются процессы ползучести и материал переходит в состояние, близкое к сверхпластичности. **Цель работы:** оценка влияния обработки алюминиевых сплавов В-1461 (Al-Cu-Li-Zn) и В95 (Al-Mg-Zn-Cu) давлением в режиме ползучести на прочность. **В работе исследовано** влияние технологии обработки давлением алюминиевых сплавов В-1461 и В95 на сопротивление усталостному разрушению. **Методы.** В работе используется метод, позволяющий определить предельные напряжения при помощи диаграмм накопления необратимых деформаций, а также метод формообразования толстых плит (40 мм) в режиме ползучести. Применяются ранее подобранные оптимальные температуры для формования плит. Используется бесконтактная координатно-измерительная система для проведения контроля поверхности после формования. Выполнена фратография излома образцов сплавов В-1461 и В95 после усталостного разрушения. Проведено математическое моделирование процесса деформирования плит в условиях ползучести в пакете MSC.Marc. **В результате** получена консервативная оценка предела выносливости для алюминиевых сплавов В-1461 и В95. Выполнено формообразование толстых плит в режиме ползучести. Более 80 % поверхности плиты отформовано с отклонением менее 1 мм от целевого размера. Проведены усталостные испытания образцов, изготовленных из отформованных панелей сплавов В-1461 и В95, построены усталостные кривые. Фратография поверхности усталостного излома показала наличие окислов у образцов сплава В-1461 в отличие от сплава В95. **Обсуждаются результаты** испытаний на усталость, показывающие, что характеристики технологического процесса формообразования и термообработки не ухудшают усталостные свойства исследованных сплавов. Сравнительные испытания показали, что сплав В-1461 имеет более высокие усталостные характеристики. Математическое моделирование показало, что использование закона установившейся ползучести Бойла – Нортон недостаточно для описания процесса формовки плиты; отмечена необходимость постановки обратной задачи формообразования, где в качестве граничных условий должны выступать координаты пуансонов нагружающего устройства.

Для цитирования: Влияние технологии горячего формообразования плит из алюминиевых сплавов В-1461 (Al-Cu-Li-Zn) и В95 (Al-Zn-Mg-Cu) на сопротивление усталостному разрушению / К.В. Захарченко, В.И. Капустин, А.Ю. Ларичкин, Я.Л. Лукьянов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 94–109. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-94-109.

*Адрес для переписки

Захарченко Кирилл Владимирович, к.т.н., ст. преподаватель
Новосибирский государственный технический университет,
пр. К. Маркса, 20,
630073, г. Новосибирск, Россия
Тел.: +7 (383) 346-17-64, e-mail: zaharchenkok@mail.ru

Введение

Несмотря на широкое использование композиционных материалов в авиационной технике [1], возможности высокопрочных алюминиевых сплавов еще не исчерпаны. Стоит обратить внимание на алюминиевые сплавы системы Al-Zn-Mg-Cu, которые традиционно занимают нишу основного материала для изготовления силовых элементов планера самолетов. В последние годы широко исследуются перспективы применения высокопрочного алюминиево-литиевого сплава марки В-1461 (аналог 2099) в конструкциях новых самолетов взамен В95оч [2]. Механические свойства материала В-1461 превосходят таковые у материала В95: плотность на 25 % ниже, модуль упругости на 9 % выше, удельная прочность на 11 % выше, предел текучести на 14 % выше, характеристики жаропрочности и коррозионной стойкости в 1,5...2 раза выше [3].

Решая задачи авиационной техники, связанные со снижением веса конструкции летательных аппаратов (ЛА), можно предложить:

1) применение в конструкции деталей из новых алюминиевых сплавов пониженной плотности, например В-1461, легированных литием, каждый процент содержания которого снижает плотность сплава на 3 % и повышает модуль упругости на 6 % [1, 3, 4];

2) использование в обработке металлов давлением явления ползучести и деформирование заготовок деталей в условиях, близких к сверхпластичности для заданного сплава, с последующей операцией возврата свойств материала уже деформированной заготовки, что обеспечит сохранение ресурса, позволит уменьшить вес конструкции [5], сократит время и снизит затраты на изготовление габаритных изделий.

Рассматриваемый технологический процесс формообразования в режиме ползучести и близком к сверхпластичности был реализован на установке УФП-1М [6, 7], которая обеспечивает изготовление панели в заданном поле предельных отклонений на размер, допусков формы и расположения поверхностей.

Так как проблема прочности авиационных материалов

при циклических нагрузках важна в самолетостроении, то и оценка влияния технологии формообразования на сопротивление усталостному разрушению для сплавов В95 и В-1461 актуальна.

Тестирование образцов материала при помощи ускоренного метода [8] позволяет сократить трудоемкость и длительность процесса усталостных испытаний. Согласно авиационным правилам МАК, пригодность и долговечность материалов, используемых для изготовления деталей летательных аппаратов (ЛА), поломка которых может повлиять на безопасность, должны сопровождаться экспериментальной проверкой.

Целью данной работы является оценка влияния обработки металлов давлением в режиме ползучести на сопротивление усталостному разрушению.

Методика исследований

Образцы для испытаний

Для сокращения объема усталостных испытаний исследовались деформационные свойства образцов сплава. Эти исследования позволяли оценить предельное напряжение усталости материала по диаграмме накопления необратимых деформаций. Использовались образцы типа IV по ГОСТ 25.502–79. Для испытаний на усталость использовались образцы типа VII по ГОСТ 25.502–79, $K_t = 2,6$, изготовленные из плиты В-1461Т1, В95 (рис. 1.). K_t – теоретический коэффициент концентрации нормальных напряжений.

Оборудование

Для определения деформационных свойств и циклической долговечности образцов из материала, подвергнутого формообразованию, при

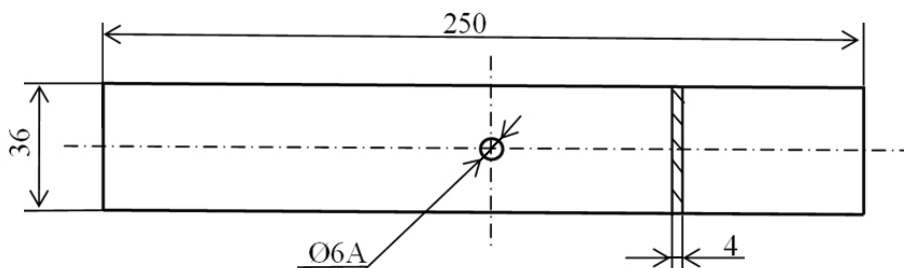


Рис. 1. Образец для испытаний на усталость

Fig. 1. Fatigue test specimen

сравнительных испытаниях применялась испытательная универсальная система Instron 8801. При испытании образцов реализовывалось мягкое нагружение. Для измерения приращения компонентов тензора полных деформаций использовались штатные экстензометры: № 2620-601 Dynamic Extensometer, № W-E-404-F Transverse/Diametral Extensometer.

Для проведения формовки плит из алюминиевых сплавов В-1461, В95 применялось универсальное технологическое оборудование – установка формообразования панелей в режимах ползучести УФП-1М [9]. Для термообработки плит после формообразования использовался воздушно-закалочный агрегат ВЗА-6, для старения – печь аэродинамического нагрева ПАП-27.

Контроль соответствия поверхности формованных плит от заданной теоретической модели осуществлялся при помощи бесконтактной координатно-измерительной системы на базе лазерного радара MV 224. Погрешность измерений для размеров до 5000 мм не превышала 22,5 мкм. Микроструктура исследовалась с помощью микроскопа MERLIN Compact VP.

Определение деформационных характеристик материала при циклическом нагружении

При исследовании новых материалов обычно определяют предельные напряжения (ГОСТ 23207–78) разрушающим способом. В рамках данной работы для выяснения величин предельных напряжений использована методика, принцип которой описан в работе [8], согласно чему предельные напряжения могут быть определены с помощью диаграммы накопления необратимых деформаций или по температуре диссипативного разогрева материала.

На рис. 2 в координатах $\epsilon_{x \max}$, $\epsilon_{y \max}$, $\epsilon_{x \min}$, $\epsilon_{y \min}$ от $\sigma_{x \max}$, $\sigma_{x \min}$ представлены экспериментальные диаграммы накопления необратимых деформаций гладких образцов из сплава марки В-1461 по программе со ступенчато увеличивающейся нагрузкой – при отнулевых циклах растягивающих (2), сжимающих (3) и симметричном (1) цикле напряжений. Индекс «x» означает направление вдоль образца (направление приложения нагрузки), «y» – поперечное направление.

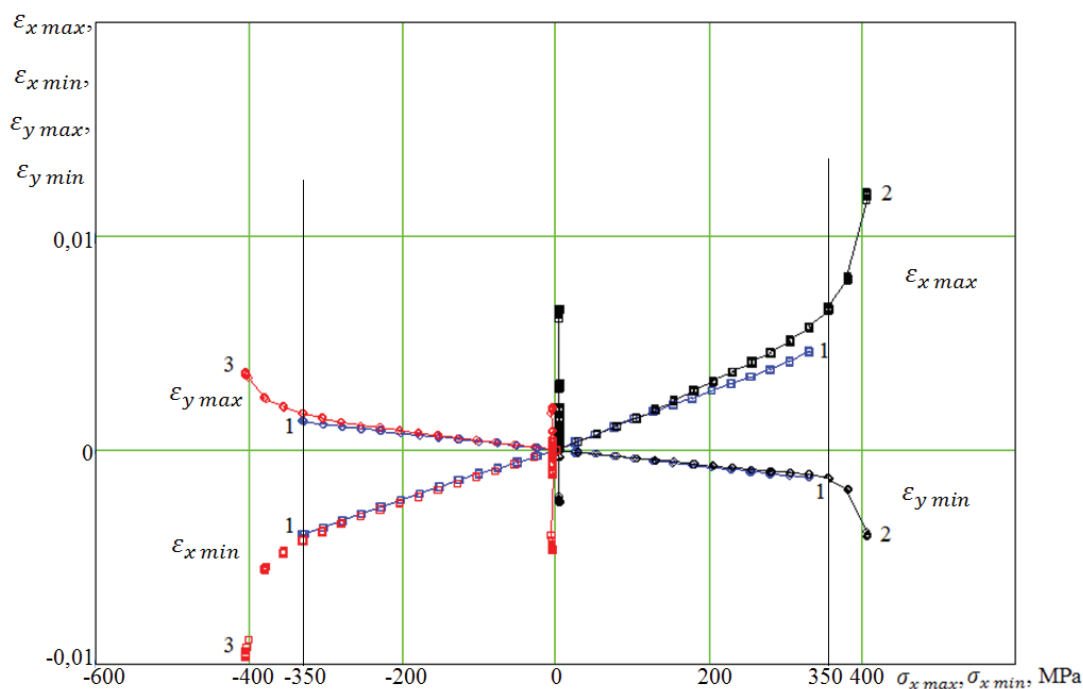


Рис. 2. Накопление необратимых деформаций при ступенчатом увеличении напряжений. Сплав В-1461

Fig. 2. Irreversible deformations accumulation for smooth samples with a stepwise increased loading. Al-Cu-Li-Zn alloy

Из диаграммы накопления необратимых деформаций, представленной на рис. 2, видно, что деформирование материала В-1461 при отнулевом цикле как в области растягивающих напряжений (2) так и в области сжимающих напряжений (3) происходит симметрично. Это характеризует изотропию свойств материала В-1461, не зависящую от знака напряжений в процессе периодического нагружения.

При амплитуде, превышающей 175 МПа, в области как растягивающих, так и сжимающих напряжений в материале образца активизируются диссипативные процессы, о чем свидетельствует накопление необратимых деформаций.

Оценки пределов выносливости для сплавов В-1461 и В95 соответствуют $\sigma_{x \max} = 350$ МПа и $\sigma_{x \max} = 250$ МПа соответственно [10].

Уровни напряжения, при которых проводились усталостные испытания образцов сплава марки В95, больше предельного напряжения для этого материала, определенного по ускоренной методике на гладких образцах. Используя предел выносливости материала (образец без концентратора напряжений), который составлял 250 МПа, определялся расчетный предел выносливости образца с отверстием по формулам [11]:

$$K_{ff} = q(K_t - 1) + 1; \quad (1)$$

$$\sigma_{ff} = \frac{\sigma_f}{K_{ff}}, \quad (2)$$

где K_{ff} – расчетный усталостный коэффициент выреза при действии нормальных напряжений, определяемый на основании среднего значения q – коэффициента чувствительности материала к концентрации напряжений, который для алюминиевого сплава равен 0,85 при радиусе отверстия $r = 3$ мм [11]; σ_f и σ_{ff} – пределы ограниченной выносливости образца при осевом нагружении без концентратора и с концентратором напряжений соответственно.

Тогда для сплава В95

$$K_{ff} = q(K_t - 1) + 1 = 0,85(2,6 - 1) + 1 = 2,36;$$

$$\sigma_{ff} = \frac{\sigma_f}{K_{ff}} = \frac{250}{2,36} = 106 \text{ МПа.}$$

Первый и второй уровни напряжений ($\sigma_{\max 1}^{\text{нетто}}$ и $\sigma_{\max 2}^{\text{нетто}}$) для образца сплава В95 с концентратом напряжений, при которых проводились усталостные испытания, выше, чем предел ограниченной выносливости ($\sigma_{ff} = 106$ МПа), полученный при ускоренной оценке.

Для сплава В-1461 назначенные уровни напряжений при испытаниях были такими же, что позволяло оценивать сопротивление усталостному разрушению материалов. При этом разница между напряжением при испытаниях и предельным напряжением ($\sigma_{ff} = 148$ МПа) была меньше. Это позволяло получить сравнительную оценку свойств материалов на базах до 10^6 циклов.

Технологический процесс формообразования плиты сложной геометрии

Технологический процесс формообразования плит (1800×800×40 мм) в режиме ползучести на установке УФП-1М (НАЗ им. В.П. Чкалова) описан в [9]. Как следует из [10, 12], оптимальной температурой для формования толстой панели из В-1461 выбрана температура T , равная 470 °С, а для В95 – 420 °С. Для сплава В-1461 данная температура является температурой проката плит [13].

Термообработка формованных плит включала в себя закалку и старение [10, 12].

Статистическая обработка результатов

Для построения кривых распределения долговечности и пределов выносливости, а также оценки средних значений и среднеквадратичных отклонений результаты испытаний подвергают статистической обработке.

Статистическая обработка результатов усталостного эксперимента выполнена на основе гипотезы о логарифмически нормальном законе распределения долговечности. Числовые характеристики распределения непрерывных случайных величин определены по следующим формулам:

– математическое ожидание

$$\bar{x} = \lg N_{cp} = (\sum \lg N_i) / n; \quad (3)$$

– среднеквадратичное (стандартное) отклонение

$$S_n = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\lg N_i - \bar{x})^2 / (n-1)}; \quad (4)$$

– доверительный интервал на математическое ожидание

$$\bar{x} - t_q S_n / n^{1/2} < a < \bar{x} + t_q S_n / n^{1/2}, \quad (5)$$

где t_q – критерий Стьюдента; n – объем выборки.

Результаты и их обсуждение

Усталостные характеристики образцов из плит В-1461 и В95 после формообразования и термообработки

После выполнения формообразования из плит изготавливались образцы для усталостных испытаний на установке Instron 8801. Испытание образцов проводилось на двух уровнях

нагрузки при максимальном напряжении цикла $\sigma_{\text{макс1}}^{\text{нетто}} = 157$ МПа и $\sigma_{\text{макс2}}^{\text{нетто}} = 196$ МПа, с коэффициентом асимметрии $R = 0$, на частоте $f = 3$ Гц.

Результаты усталостных испытаний образцов приведены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что для сплава В95 пределы ограниченной выносливости и доверительные интервалы (доверительная вероятность $P = 0,95$) материала соответствуют описанным в [14, с. 135]. Средние значения долговечности на исследуемых уровнях нагружения сплава В95 равны $1,1 \cdot 10^5$ и $4,5 \cdot 10^4$ циклов при $\sigma_{\text{макс1}}^{\text{нетто}} = 157$ МПа и $\sigma_{\text{макс2}}^{\text{нетто}} = 196$ МПа соответственно.

Предел ограниченной выносливости для сплава В-1461 при уровне напряжения $\sigma_{\text{макс1}}^{\text{нетто}} = 157$ МПа, как следует из [3], лежит в интервале $1,6 \cdot 10^5 \dots 2,5 \cdot 10^5$ циклов. Однако из рисунка видно, что циклическая долговечность при $\sigma_{\text{макс1}}^{\text{нетто}} = 157$ МПа имеет значительное рассеяние:

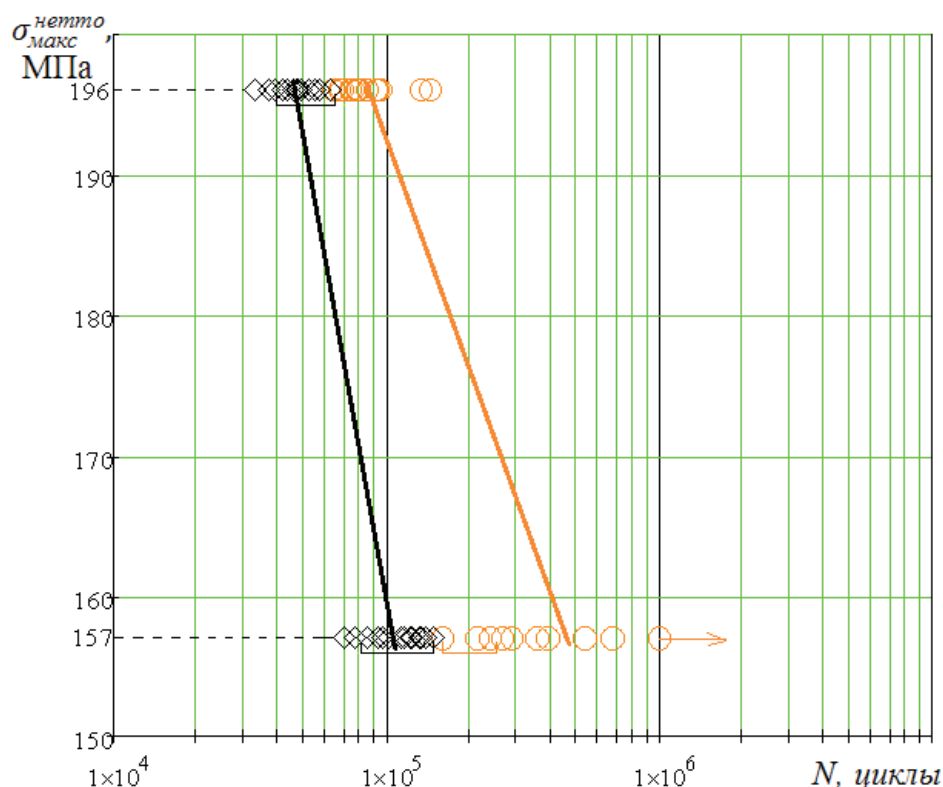


Рис. 3. Влияние обработки металлов давлением в режиме ползучести на выносливость:

◇ – сплав В95; ○ – сплав В-1461, ⊞ – доверительный интервал

Fig. 3. Effect of metal shaping in creep mode on enduring quality:

◇ – Al-Zn-Mg-Cu alloy; ○ – Al-Cu-Li-Zn alloy; ⊞ – confidence interval

от $1,6 \cdot 10^5$ до 10^6 циклов. Причем более 30 % образцов на этом уровне ($\sigma_{\text{макс1}}^{\text{нетто}} = 157 \text{ МПа}$) не разрушилась. Средние значения долговечности сплава В-1461: $4,5 \cdot 10^5$ и $8,6 \cdot 10^4$ при $\sigma_{\text{макс1}}^{\text{нетто}} = 157 \text{ МПа}$ и $\sigma_{\text{макс2}}^{\text{нетто}} = 196 \text{ МПа}$ соответственно.

Сравнительный анализ циклических испытаний материалов В95 и В-1461 показывает, что средние значения долговечности на исследуемых уровнях напряжения для сплава В-1461 не меньше указанных в [3] при $\sigma_{\text{макс1}}^{\text{нетто}} = 157 \text{ МПа}$, а по отношению к сплаву В95 больше в 4 раза и в 1,8 раза – при $\sigma_{\text{макс1}}^{\text{нетто}}$ и $\sigma_{\text{макс2}}^{\text{нетто}}$ соответственно.

В сравнении с показателями долговечности, указанными в [3, 14], для сплава В95 они не ухудшались, а для сплава В-1461 получено повышение характеристик малоциклового устало-

сти для образцов после технологической обработки более чем в 3 раза [3].

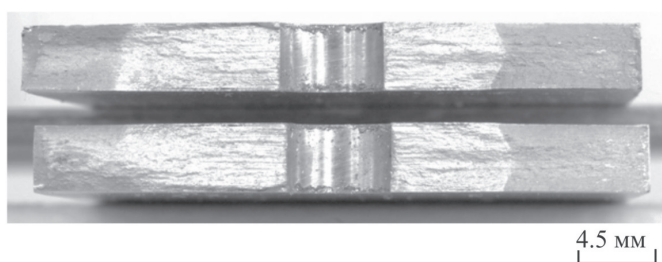
Формирование в микроструктуре сплава В-1461 при температуре 470°C равномерно распределенных дисперсных интерметаллидных фаз повышает относительное удлинение и снижает предел текучести [13, 15].

Необходимо отметить, что результаты испытаний не выявили зависимости значений долговечности образцов от места вырезки заготовок из плиты.

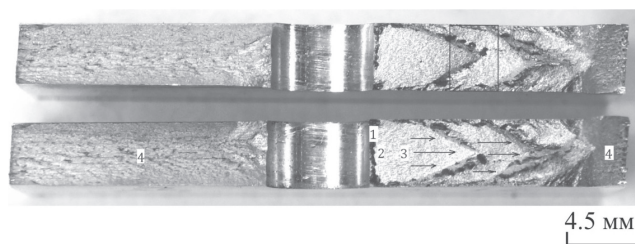
Фрактографические исследования

На рис. 4 приведены фотографии типовых усталостных изломов образцов из сплавов марок В95 (рис. 4, а) и В-1461 (рис. 4, б).

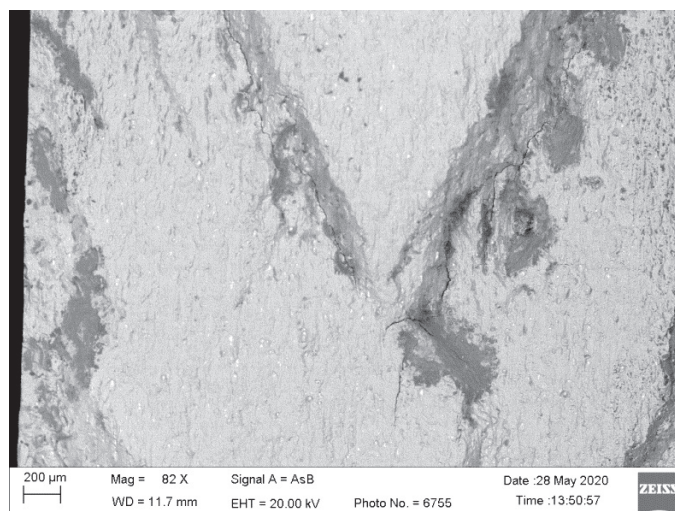
В образце сплава В-1461 очаг усталостного разрушения формируется типичным образом – с поверхности 1 (рис. 4, б) в условиях окружающей среды. Поэтому деформация в зонах кон-



а



б



в

Рис. 4. Поверхности изломов образцов из плит сплавов марок В95 и В-1461:

а – сплав В95; б, в – сплав В-1461

Fig. 4. Fracture surfaces of samples cut out of Al-Cu-Li-Zn and Al-Zn-Mg-Cu plates:

а – Al-Zn-Mg-Cu alloy; б, в – Al-Cu-Li-Zn alloy

центрации напряжения протекает с процессами окисления. Фокус излома 2, как оказалось, можно проследить по наличию черных точек – они располагаются в той зоне металла, где наиболее интенсивно протекает его деформация и где раскрывается трещина, в которую неизбежно попадает кислород из атмосферы (рис. 4, б). 3 – участок ускоренного развития излома. На удалении от зоны старта трещины с одной стороны от концентратора с поверхности и с другой стороны от концентратора происходит квазихрупкое разрушение материала – зона долома 4. Влияние воздействия окружающей среды на поведение материалов широко освещено в научной литературе [16–18].

Металлографические исследования поверхности излома образца марки В-1461 (рис. 4, в – увеличенный фрагмент, обозначенный черным квадратом на рис. 4, б), выполненные в заводской лаборатории, показывают, что в местах скопления черных точек (каверн) проходит трещина. Аналогичные наблюдения отсутствуют на сплаве марки В95 – возможно, по причине иного химического состава.

Для выяснения причин разрушения было необходимо определить химический состав точек черного цвета на поверхности излома в сплаве В-1461 (место выделено черным квадратом). Был выполнен микрорентгеноспектральный анализ с использованием микроанализатора EDS X-Act (фирма Oxford Instruments). Показано, что эти места содержат большое количество кислорода (рис. 5, б, г). В остальных зонах излома кислород отсутствует (рис. 5, в, д). Элементный состав близок к составу высокопрочного сплава.

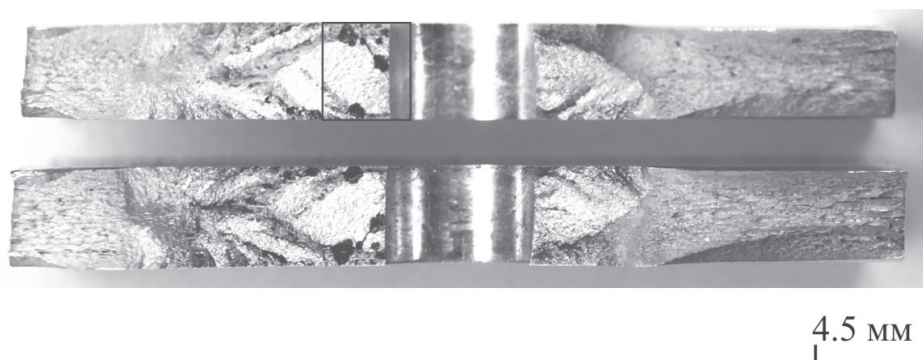
Сравнение отформованной и целевой поверхностей

С помощью лазерного радара MV 224 на поверхности отформованной плиты определены пространственные координаты характерных точек, что позволило вычислить отклонения координат этих точек от целевой (номинальной) формы объекта. Анализ полученных данных после формообразования плиты показал хорошее соответствие; максимальные отклонения в контрольных точках находятся в диапазоне от –9,27 до +5,37 мм (рис. 3). Не более 2,5 % площади плиты деформировано с отклонением от теории менее 9,27 мм. Более 80 % площади плиты деформировано с отклонением менее 1 мм.

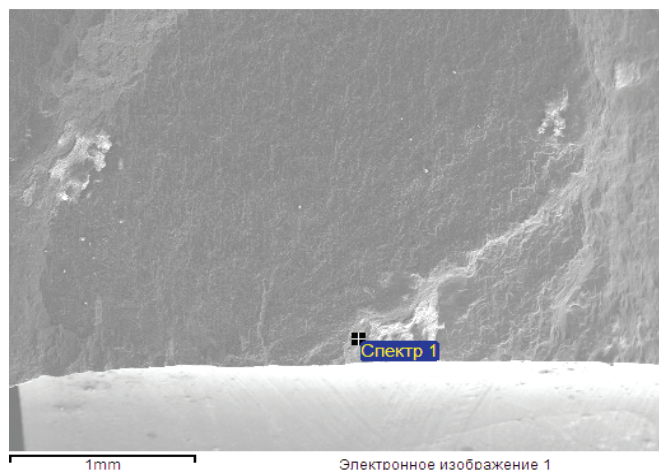
Было проведено конечноэлементное моделирование процессов формообразования плит из сплавов В95 (Al-Cu-Mg-Zn) и В-1461 (Al-Cu-Li-Zn) в расчетном пакете MSC.Marc 2012 с граничными условиями формовки, аналогичными тем, которые были в эксперименте. Материалы задавались изотропно упругими, а закон установившейся ползучести принимался в виде степенной зависимости Бойла – Нортон. Параметры упругости и ползучести исследуемых материалов приведены в работе [9]. Параметры модели для материала В95 выбирались соответствующими температуре T , равной 420 °С, а для плиты из В-1461 – 470 °С, как оптимальные для деформирования плиты 50 мм. Пуансоны как твердые тела, с помощью которых совершалось деформирование, размещались относительно панели согласно их положению при натурном испытании. Возле плиты располагались две группы пуансонов с обеих сторон от плиты оппозитно друг другу на расстоянии 180 мм и на расстоянии 65 мм от плиты, которая находилась в плоскости симметрии пространства печи. Процесс дискретизации определяющих уравнений для решения при помощи метода конечных элементов (МКЭ) приведен в работе [19].

Сравнение форм целевой поверхности плиты с результатами моделирования для материала В95 приведено на рис. 6.

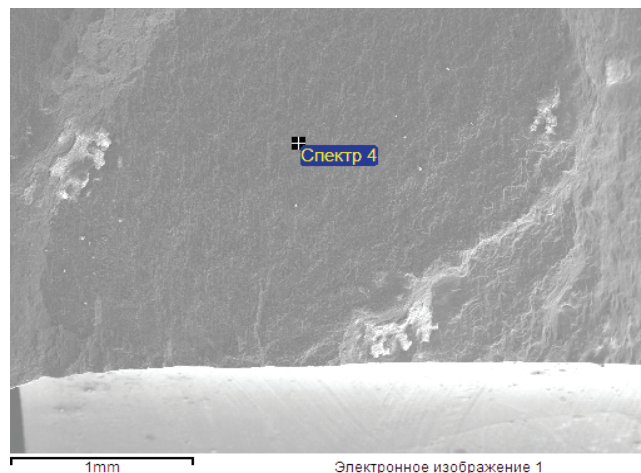
Алгоритм работы. Для того чтобы сравнить две поверхности или меру отличия двух тел после деформирования прямой плиты в условиях ползучести, необходимо иметь mesh-модели, т. е. сетки целевой плиты и плиты, полученной в результате моделирования, в виде файла текстовых данных с координатами узлов конечных элементов. Это можно сделать, переведя сетки в программу конечноэлементного моделирования MSC.Marc и выгрузив их либо в виде файла input MCS.Marc data (*.dat файл), либо в виде файла результатов (*.rpt, текстовый файл Marc report), либо в виде файла для дальнейшей работы в пакете Patran (*.pbn). Для работы с данными в первом случае необходимо подготовить данные координат узлов. Файлы должны содержать только координаты узлов, разделенные пробелом и отступом строки. Далее в программу MeshLab импортируются оба множества точек (для целевой формы и для формы, полученной в результате моделирования). Затем, используя функцию



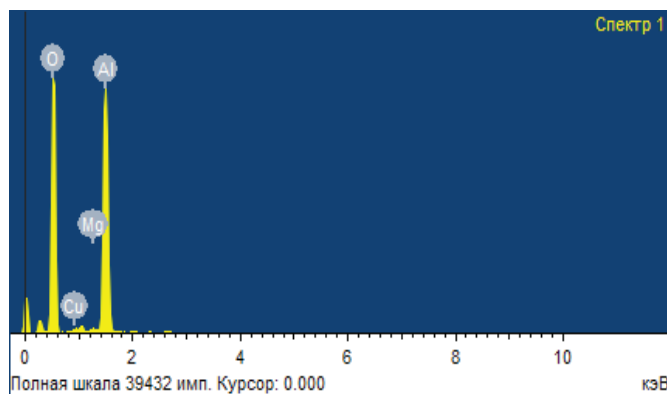
a



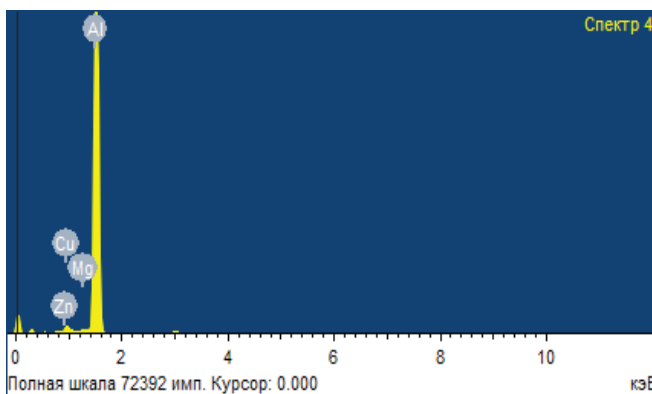
б



в



г



д

Рис. 5. Спектр элементного состава поверхности излома образцов из плиты сплава марки В-1461:

а – сплав В-1461; б, г – соответствует зоне 1 – очаг излома; в, д – соответствует зоне 3 – участку ускоренного развития излома

Fig. 5. Spectrum of the elemental composition of the fracture surface of specimens cut out of a Al-Cu-Li-Zn alloy plate:

а – Al-Cu-Li-Zn alloy; б, г – corresponds to zone 1 – fracture center; в, д – corresponds to zone 3 – the area of the accelerated fracture propagation

сравнения по мере Хаусдорфа, для каждой точки проводится вычисление расстояния между ближайшими узлами двух сеток. После этого файл данных *.ply выгружается в текстовом виде. Дальнейший анализ данных проводится по точ-

кам в программе Microsoft Excel. Результат сравнения двух сеток приведен на рис. 7.

На рис. 6 приведено сравнение абсолютных отклонений по оси Z между расчетной и целевой формой, которое проводилось для 14 различных

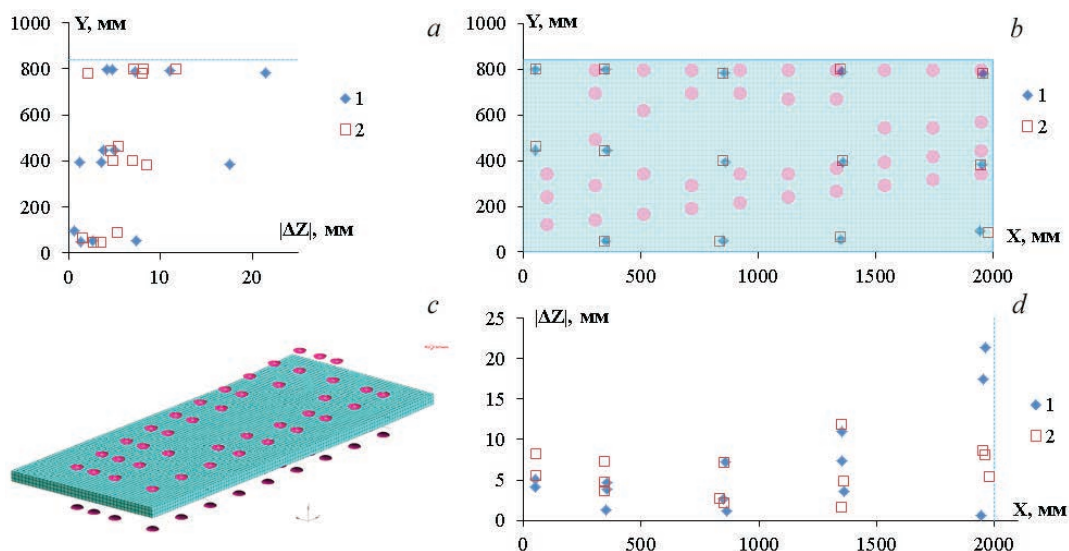


Рис. 6. Вид конечноэлементной модели и сравнение абсолютных отклонений по оси Z между расчетной формой, целевой формой и данными эксперимента для сплава В950ЧТ2. Сравнение отклонений:

1 – между целевой формой и экспериментом; 2 – отклонения между целевой формой и расчетной формой; а – контрольные точки, в которых производилось сравнение отклонений; с – конечноэлементная модель плиты с размещенными возле нее пуансонами; b, d – сравнение абсолютных отклонений по оси Z вдоль осей Y и X соответственно

Fig. 6. View of the finite element model and comparison of the absolute deviations along the Z axis between the designed shape, target shape and experimental data for the Al-Zn-Mg-Cu alloy. Comparison of deviations:

1 – between the target shape and the experiment; 2 – deviation between the designed shape and target shape; a – control points at which deviations are compared; c – finite element model of a plate with punches placed near it; b, d – comparison of absolute deviations along the Z axis along the Y and X axes, respectively

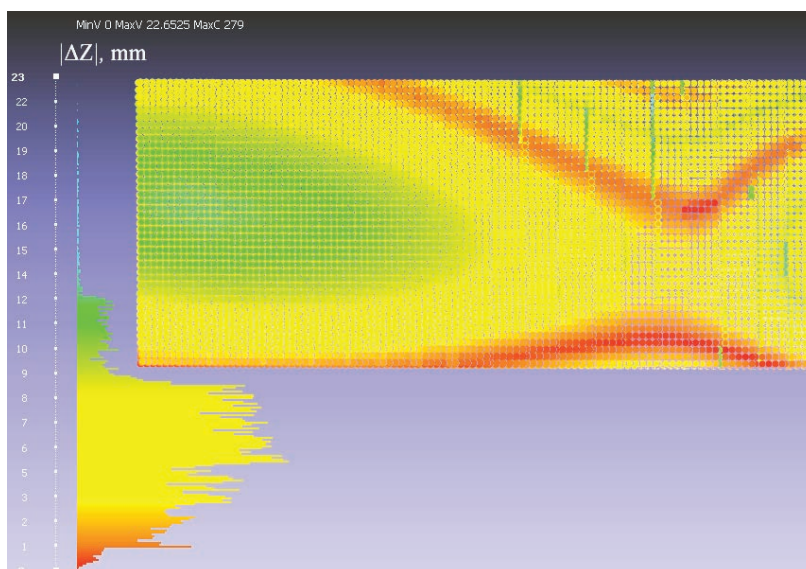


Рис. 7. Результат сравнения сеток целевой формы панели и полученной при моделировании в программе MeshLab, шкала отклонений абсолютных величин

Fig. 7. The result of comparing the grids of the panel target shape and that obtained during modeling in MeshLab, the scale of deviations of absolute values

точек на поверхности плиты (рис. 6, *a*). Анализ отклонений показал, что приложение аналогичных эксперименту граничных условий для тех же временных рамок и материала дает отклонение расчетной плиты (маркер 1) от целевой формы, но в абсолютных величинах меньшее, чем отклонение формы плиты в эксперименте (маркер 2) от целевой. Результат моделирования плиты получился отличным от целевой формы, что можно объяснить: 1) простотой модели ползучести, неучетом температурных эффектов и сложности реологии материала (различие свойств ползучести при растяжении и сжатии, анизотропия свойств ползучести); 2) неудачным выбором перемещений пуансонов вдоль оси Z ; 3) неудачным вариантом размещения пуансонов.

На рис. 7 приведены результат сравнения формы плиты, рассчитанной в пакете MSC.Marc 2012, и целевой формы плиты для материала B95. Сравнение моделей двух тел проводилось по мере Хаусдорфа в программе MeshLab. Модели выгружались в программу в виде координат узлов. Мера Хаусдорфа определялась как кратчайшее расстояние от ближайших точек двух моделей. На шкале приведена разница координат по оси Z между близкими точками.

На рис. 8 приведены сетки панелей в изометрической проекции для деформированной и целевой формы. Рисунок демонстрирует разницу проекций панели для координатных плоскостей XZ и YZ . Поскольку в данном случае деформации плиты были небольшими, то визуально сложно оценить разницу поверхностей плит, поэтому оптимальным остается сравнение форм средствами MeshLab.

На рис. 9 приведена конфигурация плиты из алюминивно-литиевого сплава B-1461, полученная при моделировании КЭ для случая температуры деформирования T , равной 470 °С. Стоит отметить, что для принятого закона ползучести уровень остаточных напряжений в плите при данной температуре не превышает 1,7 МПа. Однако нужно учитывать, что уровень остаточных напряжений повысится при охлаждении плиты до нормальной температуры.

По представленному выше алгоритму сравнения геометрии двух плит было проведено сравнение рассчитанной при моделировании формы плиты с целевой формой плиты для сплава B-1461.

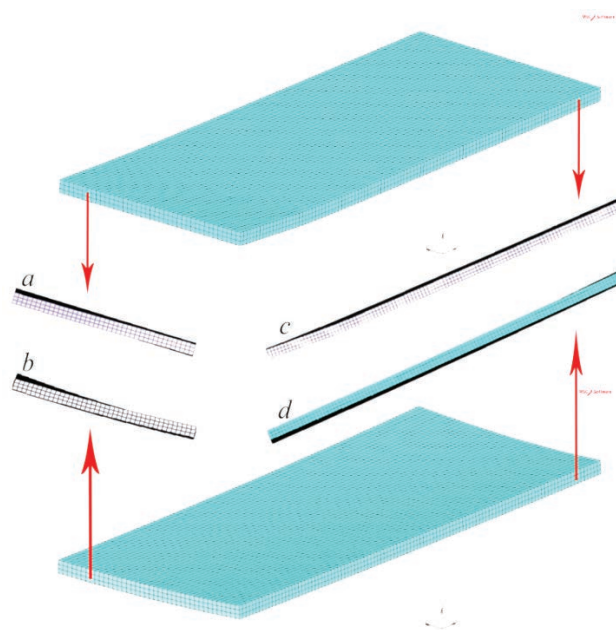


Рис. 8. Вид сетки конечных элементов

для деформированной панели: *a* – проекция панели на плоскость YZ ; *c* – проекция на плоскость XZ . Для целевой панели: *b* – проекция панели на плоскость YZ ; *d* – проекция на плоскость XZ

Fig. 8. Finite element mesh view

for a deformed panel: *a* – panel projection onto the YZ plane; *c* – projection onto the XZ plane. For the panel: *b* – projection of the panel on the YZ plane; *d* – projection onto the XZ plane

На рис. 10 показана разница между формами в результате моделирования плиты № 2 и целевой формой плиты при заданном расположении и перемещении штоков установки, взятыми как в эксперименте. Шкала показывает разницу ближайших точек двух форм по мере Хаусдорфа в направлении оси OZ . На рисунке видно несовпадение форм плит. Из приведенного сравнения можно сделать вывод о необходимости постановки и решения обратной задачи формообразования с учетом свойств физической нелинейности материала плиты и ее упругой разгрузки после деформирования. Один из подходов к решению данной задачи приведен в работе [20]. Стоит отметить, что прогнозированием свойств исследуемых сплавов при длительном воздействии повышенных температур, в том числе с использованием более сложных законов ползучести, занимаются авторы работ [21–23]. Для исследователей основными задачами поиска являются определение взаимосвязи концентрации дислокаций в металлах со скоростью деформирования и значением предельной деформации

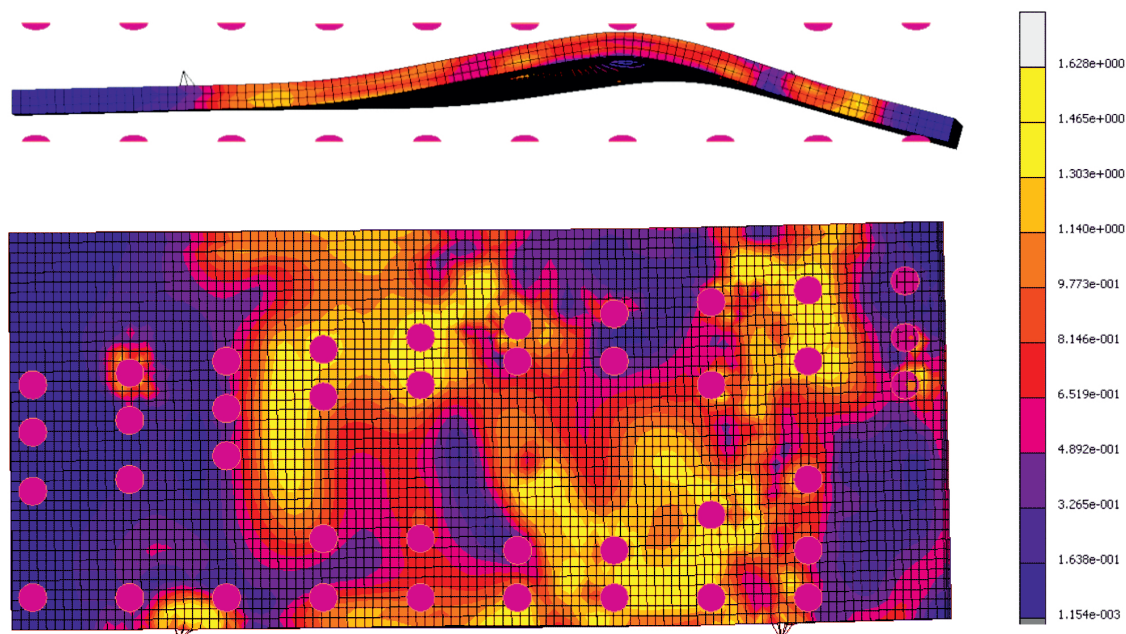


Рис. 9. Конфигурация плиты из сплава В-1461 после деформирования и снятия нагрузки, а также распределение интенсивности остаточных напряжений по Мизесу

Fig. 9. Configuration of a FE model of plate made of Al-Cu-Li-Zn alloy after deformation and unloading, as well as the distribution of the intensity of residual stresses according to Mises

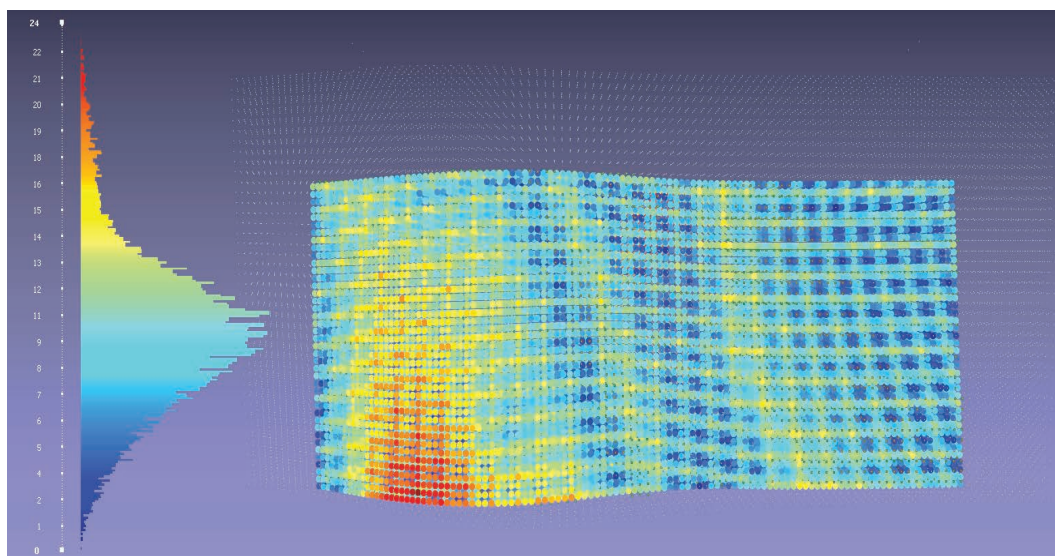


Рис. 10. Различие форм результатов моделирования плиты и целевой формы сплава В-1461, шкала отклонений абсолютных величин

Fig. 10. The difference between the FE modeling result of the plate and target shape for alloy Al-Cu-Li-Zn, the scale of deviations along the Z axis

до разрушения, а также выяснения влияния процесса старения материала на ударную вязкость. Для описания ползучести используются законы на основе гиперболического синуса, содержащие большое количество параметров, определяемых из экспериментальных данных, что предполагает использование оптимизационных процедур и ал-

горитмов. Математическая постановка обратных задач в условиях ползучести представлена в [24].

Стоит отметить, что целевая форма плиты и форма, полученная при моделировании, имеют различия, однако сопоставление форм рассчитанной плиты и формы целевого изделия (рис. 11) показывает хорошее соответствие:

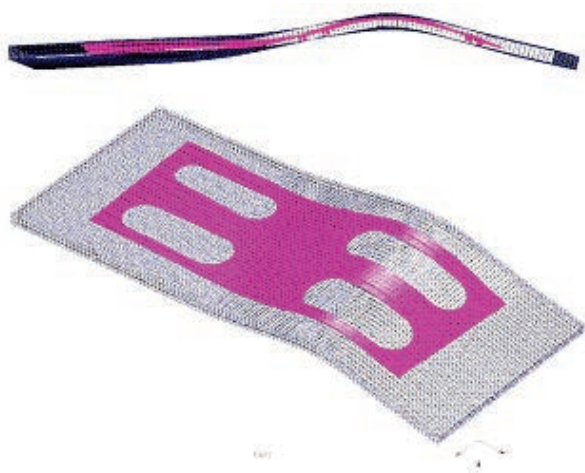


Рис. 11. Сопоставление формы плиты и формы целевого изделия

Fig. 11. Matching the shape of the plate and the shape of the target product

форма изделия полностью лежит внутри объема плиты, что указывает на возможность изготовления изделия даже при наличии неполного соответствия форм целевой плиты и плиты, полученной при моделировании.

Выводы

1. Ускоренным способом для сплавов В-1461, В95 с помощью усталостных испытаний определены и верифицированы предельные напряжения.
2. Испытаниями на усталость установлено, что формообразование плит из сплавов В-1461, В95 в режиме ползучести не ухудшает характеристики сопротивления усталостному разрушению образцов из этих полуфабрикатов.
3. Сравнительные испытания сплавов показали, что В-1461 имеет более высокие усталостные характеристики.
4. На фрактографии усталостного излома сплава В-1461 было показано появление черных точек – зон с повышенным содержанием кислорода. Деформация в этих зонах концентрации напряжения протекает с процессами окисления, что влияет на сопротивление усталостному разрушению.
5. Результат моделирования показал, что есть необходимость математической постановки обратной задачи формообразования панели, где параметрами функции оптимального деформирования будут координаты пуансонов относи-

тельно одного из углов плиты и перемещение пуансонов вдоль оси Z. При решении задачи необходимо учитывать упругий возврат панели и физическую нелинейность материала. Количественное сравнение форм двух тел, проведенное по вышеописанному алгоритму в программе MashLab, в дальнейшем позволит использовать результат сравнения в качестве критерия останова при решении последовательности прямых задач формообразования плиты.

Список литературы

1. Развитие и применение высокопрочных сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu для авиакосмической техники / И.Н. Фридляндер, О.Г. Сенаторова, Е.А. Ткаченко, И.И. Молостова // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2008. – № 8. – С. 17–21.
2. Оглодков М.С. Закономерности изменения структуры и свойств катаных полуфабрикатов из сплава В-1461 в зависимости от технологических параметров производства и термической обработки: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2013. – 26 с.
3. Перспектива применения плит из высокопрочного сплава В-1461 пониженной плотности в самолетных конструкциях / Л.Б. Хохлатова, Н.И. Колобнев, М.С. Оглодков, А.А. Филатов, Ю.А. Попова // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2014. – № 2. – С. 16–22.
4. Изменение фазового состава в зависимости от режимов старения и структуры полуфабрикатов сплава В-1461 / Л.Б. Хохлатова, Н.И. Колобнев, М.С. Оглодков, Е.А. Лукина, С.В. Сбитнева // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2012. – № 6 (684). – С. 20–24.
5. К вопросу обработки материалов давлением в режиме ползучести / Б.В. Горев, И.Д. Клопотов, Г.А. Раевская, О.В. Соснин // Прикладная механика и техническая физика. – 1980. – Т. 21, № 5 (123). – С. 185–191.
6. Патент 2056197 Российская Федерация. Способ формообразования деталей и устройство для его осуществления / П.В. Миодушевский, Г.А. Раевская, О.В. Соснин. – № 5037750/08; заявл. 15.04.1992; опубл. 20.03.1996.
7. Патент 2251464 Российская Федерация. Устройство формования / И.Д. Клопотов, И.В. Любашевская, Г.А. Раевская, Л.Л. Рублевский, О.В. Соснин. – № 2002119982/02; заявл. 22.07.2002; опубл. 10.05.2005.
8. The influence of coating technologies on stress-strain characteristics of the sample at periodic loading / K.V. Zakharchenko, V.I. Kapustin, V.P. Zubkov,

- A.V. Talanin, E.A. Maksimovski // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 894, N 1. – P. 012032. – DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012032.
9. Raevskaya G.A., Zakharchenko K., Larichkin A. Determination of optimum parameters of the technological process for plates forming from V95 and V-1461 alloys in creep applied in aircrafts constructed by “Sukhoi design bureau” // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 894, N 1. – P. 012078. – DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012078.
10. Физическое моделирование технологического процесса формообразования элементов конструкций из алюминиевого сплава В95 в условиях ползучести / А.Ю. Ларичкин, К.В. Захарченко, Б.В. Горев, В.И. Капустин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2016. – № 1 (70). – P. 6–15. – DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-6-15.
11. Peterson R.E. Stress concentration factors. – New York: Wiley, 1974. – 235 p.
12. Influence of the creep ageing process on the fatigue properties of components from V95pchT2 (analog 7175T76) and V95ochT2 (analog 7475) aluminium alloys / A. Larichkin, K. Zakharchenko, B. Gorev, V. Kapustin, E. Maksimovskiy // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 894, N 1. – P. 012050. – DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012050.
13. Ерисов Я.А., Гречников Ф.В., Оглодков М.С. Влияние режимов изготовления листов из сплава В-1461 на кристаллографию структуры и анизотропию свойств // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2015. – № 6. – С. 36–42. – DOI: 10.17073/0021-3438-2015-6-36-42.
14. Кишкина С.И. Сопротивление разрушению алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1981. – 280 с.
15. О возможности получения термостабильных высокопрочных сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu с нанодисперсным упрочнением / В.А. Троянов, А.Н. Укусников, О.Г. Сенаторова, В.Г. Пушкин // Вторые Московские чтения по проблемам прочности материалов, посвященные 80-летию со дня рождения академика РАН Ю.А. Осипьяна: тезисы докладов. – М.; Черноголовка, 2011. – С. 152.
16. Шанявский А.А. Моделирование усталостных разрушений металлов: синергетика в авиации. – Уфа: Монография, 2007. – 500 с.
17. Brown M.W., De los Rios E., Miller K.J. Environmentally assisted cracking // Proceedings ECF 12: Fracture from Defects. – Cradley Heath, 1998. – Vol. 3. – P. 1091–1248.
18. Corrosion fatigue // Fatigue '99: Proceedings 7th International Fatigue Congress / ed. by X.R. Wu and Z.G. Wang). – Beijing, China, 1999. – Vol. 4. – P. 2197–2365.
19. 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. – 2008. – Т. 9, № 1. – С. 346–365.
20. Бормотин К.С., Вин А. Метод динамического программирования в задачах оптимального деформирования панели в режиме ползучести // Вычислительные методы и программирование. – 2018. – Т. 19, № 4. – С. 470–478. – DOI: 10.26089/NumMet.v19r442.
21. Large creep formability and strength–ductility synergy enabled by engineering dislocations in aluminum alloys / Ch. Liu, J. Yang, P. Ma, Z. Ma, L. Zhan, K. Chen, M. Huang, J. Li, Zh. Li // International Journal of Plasticity. – 2020. – P. 102774.
22. Effect of creep-aging on precipitates of 7075 aluminum alloy / Y.C. Lin, Y.-Q. Jiang, X.-M. Chen, D.-X. Wen, H.-M. Zhou // Materials Science and Engineering: A. – 2013. – Vol. 588. – P. 347–356. – DOI: 10.1016/j.msea.2013.09.045.
23. Effects of creep-aging parameters on aging precipitates of a two-stage creep-aged Al-Zn-Mg-Cu alloy under the extra compressive stress / Y.C. Lin, X.-B. Peng, Y.-Q. Jiang, C.-J. Shuai // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Vol. 743. – P. 448–455. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.01.238.
24. Бормотин К.С., Бельх С.В., Вин А. Математическое моделирование обратных задач многоточечного формообразования в режиме ползучести с помощью реконфигурируемого устройства // Вычислительные методы и программирование. – 2016. – Т. 17, № 3. – С. 258–267. – DOI: 10.26089/NumMet.v17r324.

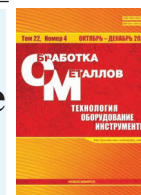
Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Influence of Technology of Hot Forming of Plates from Aluminum Alloys Al-Cu-Li-Zn and Al-Zn-Mg-Cu on Resistance to Fatigue Fracture

Kirill Zakharchenko^{1, 2, a, *}, **Vladimir Kapustin**^{2, 1, b}, **Alexey Larichkin**^{1, 3, c}, **Yaroslav Lukyanov**^{1, d}

¹ Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 15 Akademika Lavrentieva Prospekt, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

² Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

³ Novosibirsk State University, 1 Pirogova Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0003-2626-6184>,  zaharchenkok@mail.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0001-6124-2503>,  macler06@mail.ru,

^c  <https://orcid.org/0000-0002-7306-9522>,  larichking@gmail.com, ^d  <https://orcid.org/0000-0003-4526-9399>,  lukyanov@hydro.nsc.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 11 August 2020

Revised: 26 August 2020

Accepted: 14 September 2020

Available online: 15 December 2020

Keywords:

Aluminum-lithium alloy

Elastoplastic strain

Strain characteristics

Creep

Shaping

Structure

Accelerated method to evaluate metal

fatigue resistance

Finite element method

Funding

The reported study was funded by RFBR and Novosibirsk region according to the research project № 19-48-543028.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the leading process engineer of the branch of PJSC "Company "Sukhoi" "VP Chkalov Novosibirsk Aircraft Plant", Ph.D. (Engineering) Galina Rae-vskaya for consultations in the work.

ABSTRACT

Introduction. One of the primary objectives in the development of promising aircraft products is to reduce the weight of the aircraft structure. This problem can be solved by applying new low density materials such as aluminum alloys alloyed with lithium (for example, Al-Cu-Li-Zn) in the design of parts. The use of these materials in aircraft construction is limited by the processing technology, which must be such as not to damage the material and not reduce its strength properties. Such technologies include processing by pressure with heating, when creep processes are activated and the material passes into a state close to superplasticity. **The purpose of the work:** assessment of the effect of pressure shaping of aluminum alloys Al-Cu-Li-Zn and Al-Zn-Mg-Cu in creep mode on strength. **The paper investigates** the influence of the technology of pressure shaping of aluminum alloys Al-Cu-Li-Zn and Al-Zn-Mg-Cu on the resistance to fatigue failure. The work uses a **method** that allows to determine the ultimate stresses using diagrams of the accumulation of irreversible deformations; method of forming thick plates (40 mm) in the creep mode. The previously selected optimum temperatures for forming the plates are used. A non-contact coordinate measuring system is used to perform surface inspection after shaping. Fractography of the fracture of samples of alloy Al-Cu-Li-Zn and Al-Zn-Mg-Cu after fatigue failure is performed. Mathematical modeling of the deformation process of plates in creep mode is carried out in the MSC.Marc package. **As a result**, a conservative evaluation of the endurance limit for aluminum alloys Al-Cu-Li-Zn and Al-Zn-Mg-Cu is obtained. The shaping of thick plates in the creep mode is carried out. More than 80% of the board surface is formed with a deviation of less than 1 mm from the target size. Fatigue tests of samples made of molded panels of alloys Al-Cu-Li-Zn and Al-Zn-Mg-Cu are carried out, fatigue curves are plotted. The fractography of the surface of the fatigue fracture showed the presence of oxides in the samples of alloy Al-Cu-Li-Zn, in contrast to alloy Al-Zn-Mg-Cu. **The results of fatigue tests are discussed**, showing that the characteristics of the technological process of shaping and heat treatment do not deteriorate the fatigue properties of the investigated alloys. Comparative tests show that alloy Al-Cu-Li-Zn has higher fatigue characteristics. Mathematical modeling show that the use of the Boyle-Norton steady-state creep law is not enough to describe the process of plate forming. The necessity of setting the inverse problem of creep age forming is noted, where the coordinates of the punches of the loading device should act as boundary conditions.

For citation: Zakharchenko K.V., Kapustin V.I., Larichkin A.Yu., Lukyanov Ya.L. Influence of technology of hot forming of plates from aluminum alloys Al-Cu-Li-Zn and Al-Zn-Mg-Cu on resistance to fatigue fracture. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 94–109. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-94-109. (In Russian).

* Corresponding author

Zakharchenko Kirill V., Ph.D. (Engineering), Senior Lecturer
 Novosibirsk State Technical University,
 20 Prospekt K. Marksa,
 630073, Novosibirsk, Russian Federation
Tel.: +7 (383) 346-17-64, **e-mail:** zaharchenkok@mail.ru

References

1. Fridlyander I.N., Senatorova O.G., Tkachenko E.A., Molostova I.I. Razvitie i primeneniye vysokoprochnykh spлавov sistemy Al-Zn-Mg-Cu dlya aviakosmicheskoi tekhniki [Development and application of high-strength alloys of the Al-Zn-Mg-Cu system for aircraft engineering]. *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik = All materials. Encyclopedic reference book*, 2008, no. 8, pp. 17–21.
2. Oglodkov M.S. *Zakonomernosti izmeneniya struktury i svoystv katanykh polufabrikatov iz splava V-1461 v zavisimosti ot tekhnologicheskikh parametrov proizvodstva i termicheskoi obrabotki*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Regularities of alteration structure and properties of rolled semi-finished products from alloy V-1461, depending on technological parameters of production and heat treatment. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Moscow, 2013. 26 p.
3. Khokhlatova L.B., Kolobnev N.I., Oglodkov M.S., Filatov A.A., Popova Yu.A. Perspektiva primeneniya plit iz vysokoprochnogo splava V-1461 ponizhennoi plotnosti v samoletnykh konstruktsiyakh [The prospect of using slabs of high-strength alloy B-1461 of reduced density in aircraft structures]. *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik = All materials. Encyclopedic reference book*, 2014, no. 2, pp. 16–22.
4. Khokhlatova L.B., Kolobnev N.I., Oglodkov M.S., Lukina E.A., Sbitneva S.V. Izmeneniye fazovogo sostava v zavisimosti ot rezhimov stareniya i struktury polufabrikatov splava V-1461 [Variation of phase composition as a function of the mode of aging and structure of semiproducts from alloy V-1461]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal Science and Heat Treatment*, 2012, no. 6, pp. 20–24. (In Russian).
5. Gorev B.V., Klopotov I.D., Raevskaya G.A., Sosnin O.V. K voprosu obrabotki materialov davleniem v rezhime polzuchesti [To the problem of processing of materials by pressure in the creep mode]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika = Applied mechanics and technical physics*, 1980, no. 5, pp. 185–191. (In Russian).
6. Miodushevskiy P.V., Raevskaya G.A., Sosnin O.V. *Sposob formoobrazovaniya detalei i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of shaping parts and apparatus for performing the method]. Patent RF, no. 2056197, 1996.
7. Klopotov I.D., Lyubashevskaya I.V., Raevskaya G.A., Rublevsky L.L., Sosnin O.V. *Ustroystvo formovaniya* [Molding device]. Patent RF, no. 2251464, 2005.
8. Zakharchenko K.V., Kapustin V.I., Zubkov V.P., Talanin A.V., Maksimovskiy E.A. The influence of coating technologies on stress-strain characteristics of the sample at periodic loading. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 894, no. 1, p. 012032. DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012032.
9. Raevskaya G.A., Zakharchenko K., Larichkin A. Determination of optimum parameters of the technological process for plates forming from V95 and V-1461 alloys in creep applied in aircrafts constructed by “Sukhoi design bureau”. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 894, no. 1, p. 012078. DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012078.
10. Larichkin A.Yu., Zakharchenko K.V., Gorev B.V., Kapustin V.I. Fizicheskoye modelirovaniye tekhnologicheskogo protsessa formoobrazovaniya elementov konstruktsey iz alyuminiyevogo splava B95 v usloviyakh polzuchesti [Experimental modeling of technological process of pure aluminum alloy (Al-Zn-Mg-Cu) structural elements forming under creep]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovaniye, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2016, no. 1 (70), pp. 6–15. DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-6-15.
11. Peterson R.E. *Stress concentration factors*. New York, Wiley, 1974. 235 p.
12. Larichkin A., Zakharchenko K., Gorev B., Kapustin V., Maksimovskiy E. Influence of the creep ageing process on the fatigue properties of components from V95pchT2 (analog 7175T76) and V95ochT2 (analog 7475) aluminium alloys. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 894, no. 1, p. 012050. DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012050.
13. Erisov Ya.A., Grechnikov F.V., Oglodkov M.S. Vliyaniye rezhimov izgotovleniya listov iz splava V-1461 na kristallografiyu struktury i anizotropiyu svoystv [The influence of fabrication modes of sheets of V-1461 alloy on the structure crystallography and anisotropy of properties]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tsvetnaya metallurgiya = Universities' Proceedings Non-Ferrous Metallurgy*, 2015, no. 6, pp. 36–42. DOI: 10.17073/0021-3438-2015-6-36-42.
14. Kishkina S.I. *Soprotivleniye razrusheniyu alyuminiyevykh spлавov* [Fracture resistance of aluminum alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981. 280 p.
15. Troyanov V.A., Uksusnikov A.N., Senatorova O.G., Pushin V.G. [About the possibility of obtaining thermostable high-strength alloys of the Al-Zn-Mg-Cu system with nano-phase separation]. *Vtorye Moskovskie chteniya po problemam prochnosti materialov, posvyashchennye 80-letiyu so dnya rozhdeniya akademika RAN Yu.A. Osip'yana: tezisy dokladov* [Proceedings Second Moscow Readings on the Problems of Strength of Materials,

dedicated to the 80th anniversary of the birth of Academician Yu.A. Osipyan. Abstracts]. Moscow, Chernogolovka, 2011, p. 152. (In Russian).

16. Shanyavskii A.A. *Modelirovanie ustalostnykh razrushenii metallov: sinergetika v aviatsii* [Modeling of fatigue cracking of metals. Synergetics for aviation]. Ufa, Monografiya Publ., 2007. 500 p.

17. Brown M.W., De los Rios E., Miller K.J. Environmentally assisted cracking. *Proceedings ECF 12: Fracture from Defects*, Cradley Heath, 1998, vol. 3, pp. 1091–1248.

18. Wu X.R., Wang Z.G., eds. Corrosion fatigue. *Fatigue '99: Proceedings 7th International Fatigue Congress*, Beijing, China, 1999, vol. 4, pp. 2197–2365.

19. Korobeinikov S., Oleinikov A., Gorev B., Bormotin K. Matematicheskoe modelirovanie protsessov polzuchesti metallicheskih izdelii iz materialov, imeyushchikh raznye svoystva 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 = Numerical Methods and Programming*, 2008, vol. 9, no. 1, pp. 346–365.

20. Bormotin K.S., Vin A. Metod dinamicheskogo programmirovaniya v zadachakh optimal'nogo deformirovaniya paneli v rezhime polzuchesti [A method of dynamic programming in the problems of optimal panel deformation in the creep mode]. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye = Numerical Methods and Programming*, 2018, vol. 19, no. 4, pp. 470–478. DOI: 10.26089/NumMet.v19r442.

21. Liu Ch., Yang J., Ma P., Ma Z., Zhan L., Chen K., Huang M., Li J., Li Zh. Large creep formability and strength–ductility synergy enabled by engineering dislocations in aluminum alloys. *International Journal of Plasticity*, 2020, p. 102774.

22. Lin Y.C., Jiang Y.-Q., Chen X.-M., Wen D.-X., Zhou H.-M. Effect of creep-aging on precipitates of 7075 aluminum alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, vol. 588, pp. 347–356. DOI: 10.1016/j.msea.2013.09.045.

23. Lin Y.C., Peng X.-B., Jiang Y.-Q., Shuai C.-J. Effects of creep-aging parameters on aging precipitates of a two-stage creep-aged Al–Zn–Mg–Cu alloy under the extra compressive stress. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 743, pp. 448–455. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.01.238.

24. Bormotin K.S., Belykh S.V., Vin A. Matematicheskoe modelirovanie obratnykh zadach mnogotochechnogo formoobrazovaniya v rezhime polzuchesti s pomoshch'yu rekonfiguriruemogo ustroystva [Mathematical modeling of inverse multipoint forming problems in the creep mode using a reconfigurable tool]. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye = Numerical Methods and Programming*, 2016, vol. 17, no. 3, pp. 258–267. DOI: 10.26089/NumMet.v17r324.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2020 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).