

Received: 24.10.2023

Revised: 06.12.2023

Accepted: 29.12.2023

DOI: 10.17804/2410-9908.2023.6.065-077



IMPROVING THE PROCESS OF PRODUCING FORGED PIECES FOR POWER PARTS USED IN THE AVIATION INDUSTRY



Yu. V. Zamaraeva^{1,3, a), *}, A. V. Razinkin^{1, b)}, E. I. Buribaev^{1, 2, c)},
A. V. Ponomarev^{1, d)}, and E. G. Dymshakova^{1, e)}

¹Kamensk-Uralsky Metallurgical Works, JSC, 5 Zavodskaya St., Kamensk-Uralsky, 623405, Russia

²Ural Federal University, 19 Mira St., Ekaterinburg, 620002, Russia



³M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
18 S. Kovalevskoy St., Ekaterinburg, 620137, Russia

a)  <https://orcid.org/0000-0002-2620-7064>  zamaraevajulia@yandex.ru;

b)  <https://orcid.org/0009-0006-2851-227X>  razinkinAV@kumz.ru;

c)  buribaevEI@kumz.ru;

d)  ponomarevAV@kumw.ru;

e)  <https://orcid.org/0009-0002-3846-2983>  dymshakovaEG@kumz.ru

*Corresponding author. E-mail: zamaraevajulia@yandex.ru

Address for correspondence: ul. Zavodskaya, 5, Kamensk-Uralsky, 623405, Russia
Tel.: +7 (950) 200-5679

Forged pieces made of the as-delivered 1933 alloy for aircraft power units are important semi-finished products manufactured by the Kamensk-Uralsky Metallurgical Works JSC. The production of these parts is challenging due to the variation of their mechanical properties over the volume. Our goal is to find ways of stabilizing and improving the mechanical properties of forged pieces of this type. The simulation of the die-forging of a typical part reveals a 21 % difference in the accumulated amount of strain over the volume of the finished forged parts. Despite the uneven distribution, the minimum strain is sufficient to obtain the required mechanical properties. Estimating the mean normal stress over the volume of a forged piece, we have concluded that it is below the threshold level that ensures that this part is produced without cracking or failure. Experiments have shown that an increase in the holding time in aging stage I and a decrease in stage II result in an increase in the mechanical properties of the product and their uniform distribution depending on the direction.

Keywords: the 1933 aluminum alloy, die-forging, finite element method, heat treatment, aging

Acknowledgment

The research was carried out as part of the state assignment (theme Pressure, No. 122021000032-5).

References

1. Fridlyander, I.N. *Alyuminiyevye deformiruemye konstruktsionnye splavy* [Aluminum Deformable Structural Alloys]. Metallurgy Publ., Moscow, 1979, 209 p. (In Russian).
2. Fridlyander, I.N. Aluminum alloys in aircraft in the periods of 1970–2000 and 2001–2015. *Tekhnologiya Legkikh Splavov*, 2002, 4, 12–17. (In Russian).
3. Antipov, V.V., Klochkova, Yu.Yu., and Romanenko, V.A. Modern aluminum and aluminum-lithium alloys. *Aviatsionnye Materialy i Tekhnologii*, 2017, 5, 195–211. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-195-211. (In Russian).

4. Kablov, E.N., Grinevich, A.V., Lutsenko, A.N., Erasov, V.S., Nuzhnyi, G.A., and Gulina, I.V. Study of the fracture kinetics in structural aluminum alloys subjected to a long-term action of a static load and a corrosive medium using specimens of a new type. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2017, 2017, 350–355. DOI: 10.1134/S0036029517040073.
5. Fridlyander, I.N., Tkachenko, E.A., Senatorova, O.G., and Molostova, I.I. Development and application of high-strength alloys of the Al-Zn-Mg-Cu system for aerospace engineering. In: *75 let. Aviatsionnyye Materialy. Izbrannyye trudy «VIAM» 1932–2007. Yubil. Nauch.-Tekhnich. Sb.* [Aeronautical Materials. VIAM Selected Proceedings of 1932–2007: Jubilee Scientific and Technical Collection Dedicated to the 75th Anniversary]. VIAM Publ., Moscow, 2007, pp. 155–163. (In Russian).
6. Nechaykina, T.A., Blinova, N.E., Ivanov, A.L., Kozlova, O.Yu., and Kozhekin, A.E. Research of the effect of homogenization and quench hardening modes on the structure and mechanical properties of retail rings from alloy V95O.CH.–T2. *Trudy VIAM*, 2018, 10, 27–36. (In Russian).
7. Bachurin, A.S., Bobin, K.N., Matveev, K.A., and Kurlaev, N.V. Residual deformation of aircrafts aluminum parts at hardening. *Siberian Aerospace Journal*, 2013, 14 (3), 119–123. (In Russian).
8. Nechaykina, T.A., Oglovkov, M.S., Ivanov, A.L., Kozlova, O.Yu., Yakovlev, S.I., and Shlyapnikov, M.A. Features of hardening of wide cladding sheets from V95P.CH. aluminum alloy on a continuous heat treatment line. *Trudy VIAM*, 2021, 11, 25–33. (In Russian).
9. Vakhromov, R.O., Tkachenko, E.A., Popova, O.I., and Milevskaya, T.V. Summarizing of the experience of usage and optimization of manufacturing technology semi-finished products of high strength aluminum alloy 1933 for the primary structures of modern aircrafts. *Aviatsionnyye Materialy i Tekhnologii*, 2014, 2, 34–39. (In Russian).
10. Astashkin, A.I., Babanov, V.V., Selivanov, A.A., and Tkachenko, E.A. Structure and properties of massive forgings with a reduced level of residual stresses made of aluminum alloy 1933sb of balanced composition. *Trudy VIAM*, 2021, 7 (101), 13–21. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-13-21. (In Russian).
11. Li, P., Xiong, B., Zhang, Y., Li, Z., Zhu, B., Wang, F., and Liu, H. Quench sensitivity and microstructure character of high strength AA7050. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22 (2), 268–274. DOI: 10.1016/S1003-6326(11)61170-9.
12. Zhang, X., Liu, W., Liu, S., and Zhou, M. Effect of processing parameters on quench sensitivity of an AA7050 sheet. *Materials Science and Engineering, A*, 2011, 528 (3), 795–802. DOI: 10.1016/j.msea.2010.07.033.
13. Li, X.M. and Starink, M.J. Identification and analysis of intermetallic phases in overaged Zr-containing and Cr-containing Al–Zn–Mg–Cu alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, 509 (2), 471–476. DOI: 10.1016/j.jallcom.2010.09.064.
14. Marlaud, T., Deschamps, A., Bley, F., Lefebvre, W., and Baroux, B. Influence of alloy composition and heat treatment on precipitate composition in Al–Zn–Mg–Cu alloys. *Acta Materialia*, 2010, 58 (1), 248–260. DOI: 10.1016/j.actamat.2009.09.003.
15. Vakhromov, R.O., Tkachenko, E.A., Lukina, E.A., and Selivanov, A.A. Influence of homogenization annealing on structure and properties of ingots from 1933 alloy of Al–Zn–Mg–Cu system. *Trudy VIAM*, 2015, 11, 3–11. DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-11-2-2. (In Russian).
16. Galkin, V.I., Golovkina, M.G. Investigation of the effect of hof die forging conditions on formation of mechanical properties of aluminium alloy products. *Tekhnologiya Legkikh Splavov*, 2016, 1, 138–143. (In Russian).
17. Vlasov, A.V., Stebunov, S.A., Evsyukov, S.A., Biba, N.V., Shitikov, A.A., ed. by A.V. Vlasova. *Konechno-elementnoe modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov kovki i obyemnoy shtampovki* [Finite Element Modeling of Technological Processes of Forging and Die Forging: Textbook]. Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman Publ., Moscow, 2019, 384 p. (In Russian).

18. Elagin, V.I., Zakharov, V.V., and Dritz, A.M. *Struktura i svojstva splavov sistemy Al–Zn–Mg* [Structure and Properties of Alloys of the Al–Zn–Mg System]. Metallurgiya Publ., Moscow, 1982, 224 p. (In Russian).

Подана в журнал: 24.10.2023

УДК 621.7.043

DOI: 10.17804/2410-9908.2023.6.065-077



УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ШТАМПОВОК ДЛЯ СИЛОВЫХ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ



Ю. В. Замараева^{1, 3, а), *}, А. В. Разинкин^{1, б)}, Э. И. Бурибаев^{1, 2 в)},
А. В. Пономарев^{1, г)}, Е. Г. Дымшакова^{1, д)}

¹ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод», ул. Заводская, 5, Каменск-Уральский, 623405, Россия

²Уральский федеральный университет, ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, Россия



³Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Софьи Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620137, Россия

а)  <https://orcid.org/0000-0002-2620-7064>  zamaraevajulia@yandex.ru;

б)  <https://orcid.org/0009-0006-2851-227X>  razinkinAV@kumz.ru;

в)  buribaevEI@kumz.ru;

г)  ponomarevAV@kumw.ru;

д)  <https://orcid.org/0009-0002-3846-2983>  dymshakovaEG@kumz.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: zamaraevajulia@yandex.ru

Адрес для переписки: ул. Заводская, 5, Каменск-Уральский, 623405, Россия

Тел.: +7 (950) 200-56-79

В условиях ОАО «КУМЗ» важным полуфабрикатом являются штамповки из сплава 1933 в состоянии поставки Т2 для силовых узлов самолетов. Проблема производства таких деталей заключается в нестабильности уровня механических свойств по их объему. Цель работы – поиск путей стабилизации и повышения уровня механических свойств штамповок данного типа. Посредством моделирования процесса штамповки типовой детали установлено, что уровень накопленной степени деформации по объему готовой штамповки имеет разницу значений 21 %, что говорит о неравномерном распределении, однако минимального уровня деформации достаточно для получения требуемых механических свойств. Оценка среднего нормального напряжения по объему штамповки позволила установить, что оно имеет отрицательные значения уровня, обеспечивающего производство данной детали без трещин и разрушений. Экспериментальным путем установлено, что увеличение времени выдержки I ступени старения и его уменьшение на II ступени приводит к повышению уровня механических свойств исследуемой штамповки, а кроме того, к их равномерному распределению в зависимости от направления.

Ключевые слова: алюминиевый сплав 1933, штамповка, метод конечных элементов, термическая обработка, старение

1. Введение

Алюминиевые сплавы на базе системы Al–Zn–Mg–Cu занимают доминирующее положение в конструкциях авиакосмической техники благодаря удачному сочетанию свойств, а именно высокой прочности, вязкости разрушения, сопротивления усталости и коррозионной стойкости [1–4]. Одним из распространенных сплавов данной системы является высокопрочный сплав 1933, предназначенный для изготовления крупногабаритных кованых и пресованных полуфабрикатов, применяемых в деталях внутреннего силового набора (фитинги, шпангоуты, лонжероны) [5].

Следует отметить, что исследование и оптимизация режимов термической обработки (т/о) сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu, в том числе сплава 1933, является актуальной задачей

для многих авторов [6–11]. Например, в работах [12–15] показано, что при увеличении продолжительности гомогенизации слитков из сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu средний размер дисперсоидов может достигать 30–40 нм. С увеличением размера дисперсоидов уменьшается их когерентность к матрице, вследствие чего они становятся центрами гетерогенного зарождения фазы MgZn₂ в процессе распада пересыщенного твердого раствора при низкой скорости охлаждения при закалке. Авторами работы [16] изложено исследование влияния гомогенизации на растворение избыточных неравновесных фаз в слитке из сплава 1933. Установлено, что наиболее интенсивно диффузионные процессы растворения протекают в первые 12 ч после начала гомогенизации, что обеспечивает уменьшение на 40–55 % объемной доли интерметаллидных фаз (режимы 460 °С, 4 ч и 465 °С, 12 ч).

В условиях ОАО «КУМЗ» из сплава 1933 в состоянии поставки Т1, Т2 и Т3 производят штамповки, поковки и прессовую продукцию. Одними из важных изготавливаемых полуфабрикатов являются штамповки сложной формы для силовых деталей авиационной промышленности в состоянии поставки Т2 (далее – типовая штамповка). Известно, что при штамповке таких деталей формируются зоны с различной степенью деформации и структурой, а как следствие, и с различными механическими свойствами [17]. Поэтому основной проблемой производства типовых штамповок в условиях ОАО «КУМЗ» является нестабильность уровня механических свойств по их объему.

Целью работы является поиск путей стабилизации и повышения уровня механических свойств типовых штамповок по их объему.

2. Материалы и методы

В данной работе исследовали типовые штамповки в состоянии поставки Т2 из алюминиевого сплава 1933, изготовленные в производственных условиях ОАО «КУМЗ» согласно технологической схеме, представленной на рис. 1.

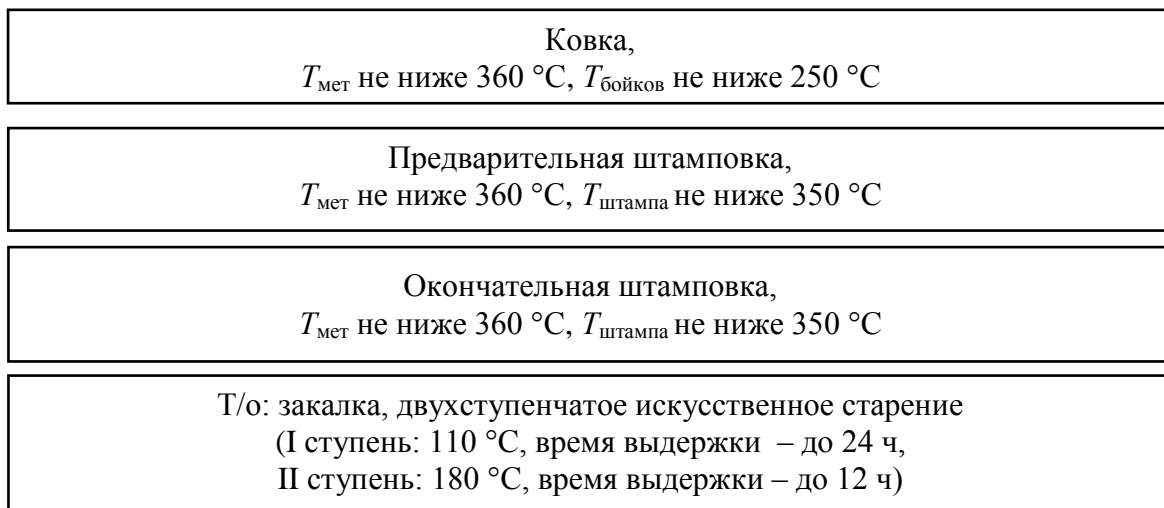


Рис. 1. Основные операции технологической схемы производства типовых штамповок

Химический состав сплава 1933 по ОСТ 1-90026-80 приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав сплава 1933

Марка сплава	Химический состав, %									Прочие	
	Кремний, Si	Железо, Fe	Медь, Cu	Марганец, Mn	Магний, Mg	Хром, Cr	Титан, Ti	Цинк, Zn	Цирконий, Zr	Каждый	Всего
1933	0,10	0,15	0,8–1,2	0,1	1,6–2,2	0,05	0,05	6,2–7,0	0,1–0,18	0,05	0,1
Примечание: алюминий – остальное											

Следует указать, что при производстве данных штамповок по классической технологической схеме (рис. 1), где режимы т/о соответствуют ПИ 1.2.699-2007, в практике ОАО «КУМЗ» часто недостаточной согласно ОСТ 1 90297-85 является их характеристика пластичности – относительное удлинение (δ). Поэтому, с целью стабилизации распределения и повышения δ , а также временного сопротивления, условного предела текучести и твердости, принято решение исследовать распределение накопленной степени деформации и среднего нормального напряжения по объему типовой штамповки посредством моделирования, а также режимы ее т/о, а именно время выдержки I и II ступеней искусственного старения, с последующим изучением механических свойств и структуры образцов.

Моделирование процесса штамповки осуществляли в программном комплексе QForm (Россия).

Изучению механических свойств подлежали темплеты, отобранные от штамповок разных партий, при разных значениях времени выдержки I и II ступеней искусственного старения (рис. 2).

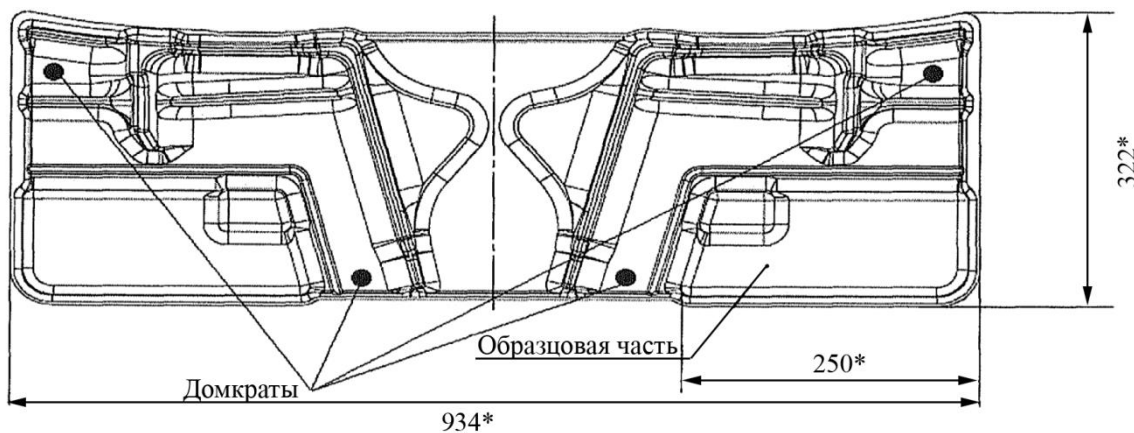


Рис. 2. Схема вырезки темплета от исследуемой штамповки

3. Ход и результаты работы

Первым этапом работы, вследствие влияния неравномерности деформационной обработки на характер распределения механических свойств, является оценка накопленной степени деформации по объему штамповки посредством моделирования в программном комплексе QForm.

Моделирование осуществлено согласно основным операциям технологической схемы производства данного вида штамповок (рис. 1).

В качестве материала для моделирования использовали алюминиевый сплав 7020 как наиболее сопоставимый материалу реального эксперимента. Модельный материал выбран из базы QForm, куда занесены его упругие свойства и кривые сопротивления деформации.

Тип задачи – изотермическая. Среда материала – пластическая.

Заготовка для первой операции технологической схемы производства данной штамповки («ковка») согласно производственным данным представлена в виде цилиндра диаметром 250 мм, высотой 460 мм. Температура нагрева металла и инструмента в операциях соответствует производственным данным. Фактор трения (закон Леванова) в операциях, с учетом применяемой смазки и экспериментальных данных ОАО «КУМЗ», назначен на уровне 0,3.

На рис. 3 с целью проверки адекватности созданной модели при расчете представлено сравнение макроструктуры образца (рис. 3 а), отобранного от готовой штамповки, и распределения линий Лагранжа в аналогичном сечении штамповки (рис. 3 б) после операции «окончательная штамповка», полученного после моделирования.

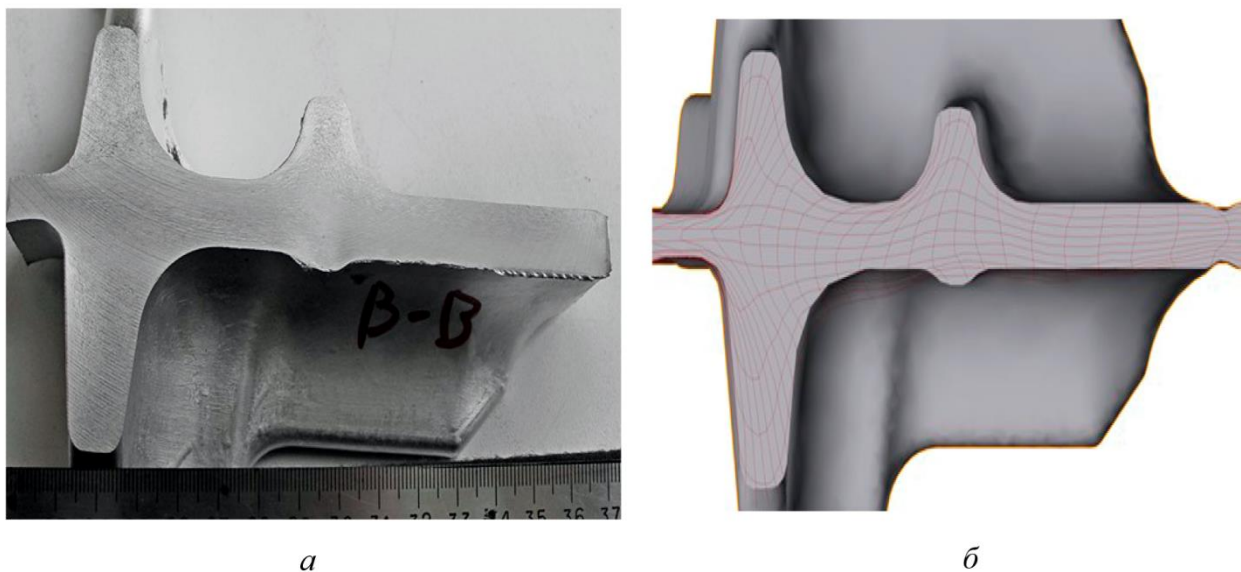


Рис. 3. Макроструктура образца (а) и распределение линий Лагранжа в аналогичном сечении штамповки (б) после операции «окончательная штамповка»

Сравнив макроструктуру образца и распределение линий Лагранжа, можно установить их однообразность. Таким образом, разработанный алгоритм создания модели, а также параметры моделирования (кривые упрочнения, граничные условия трения, параметры инструмента и заготовки и др.) соответствуют реальному процессу.

На рис. 4 представлена модель штамповки с распределением накопленной степени деформации после операции «окончательная штамповка» с учетом всех операций технологической схемы производства данной детали.

Здесь видно, что максимум степени деформации достигает 10, а минимум – 5,5, однако зона максимальных значений попадает в облой, а основной металл штамповки имеет максимальное значение степени деформации 7. Таким образом, разница значений максимума и минимума основного металла штамповки составляет 21 %, что говорит о неравномерном распределении степени деформации, однако ее уровня достаточно для получения требуемых по стандарту механических свойств.

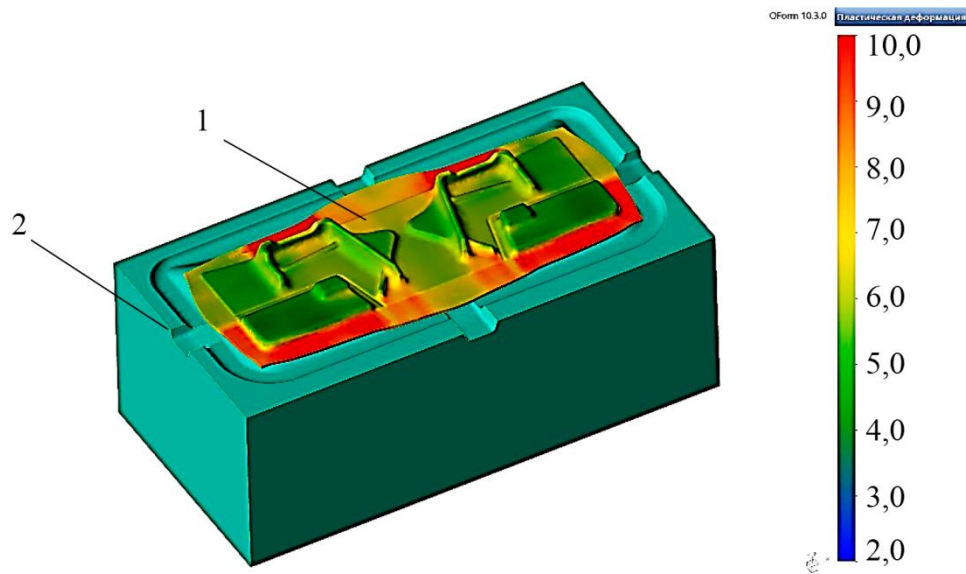


Рис. 4. Модель штамповки с распределением накопленной степени деформации после операции «окончательная штамповка» с учетом всех операций технологической схемы производства данной детали: 1 – штамповка, 2 – штамп

На рис. 5 представлена модель штамповки с распределением среднего нормального напряжения после операции «окончательная штамповка».

Здесь видно, что среднее нормальное напряжение по объему штамповки имеет отрицательные значения, достигая максимальной величины -700 МПа. Наличие отрицательных напряжений является одной из причин, обеспечивающих получение данных штамповок без трещин и разрушений того или иного вида [18]. Положительные средние нормальные напряжения возникают в зоне обрезки облоя, что не критично в данном случае.

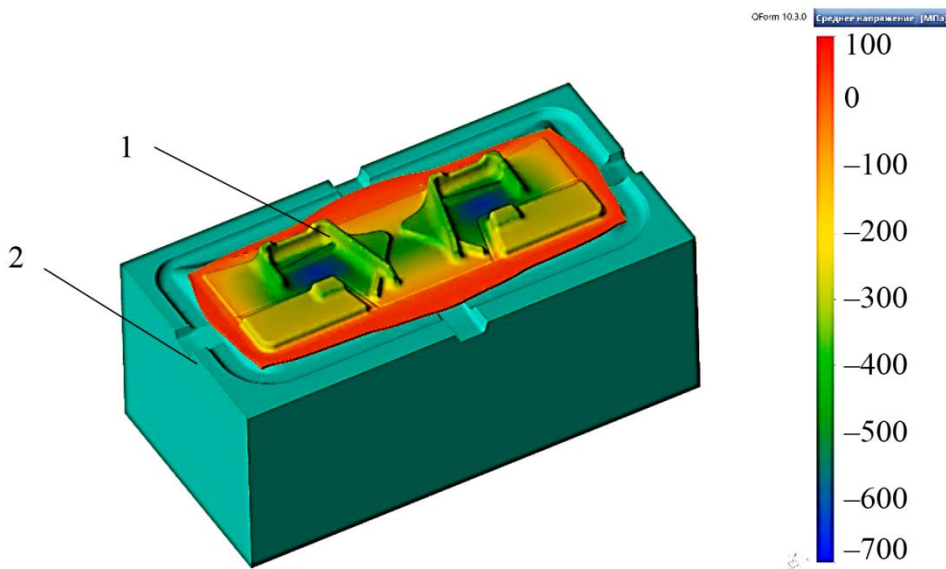


Рис. 5. Модель штамповки с распределением среднего нормального напряжения после операции «окончательная штамповка»: 1 – штамповка, 2 – штамп

Таким образом, с точки зрения схемы деформации данный процесс не имеет значительных недостатков, и стабилизировать уровень механических свойств по объему штамповки посредством ее корректировки будет экономически нецелесообразно. Поэтому принято

решение усовершенствовать режимы термической обработки, а именно время выдержки I и II ступеней старения. Следует отметить, что усовершенствование термической обработки проходило в условиях центральной заводской лаборатории, для чего от пяти штамповок разных партий отобрано по одному темплету (рис. 6). Темплеты проходили т/о согласно ПИ 1.2.699-2007 в равных условиях.



а

б

Рис. 6. Фотография штамповки, от которой отобрали темплет (а); фотография темплета (б)

Требуемые ОСТ 1 90297-85 механические свойства в зависимости от направления, выступающие критерием годности режима т/о, варьируемые режимы времени выдержки I и II ступеней старения, а также значения механических свойств в зависимости от направления для темплетов после испытаний представлены в табл. 2.

На рис. 7 данные табл. 2 представлены графически.

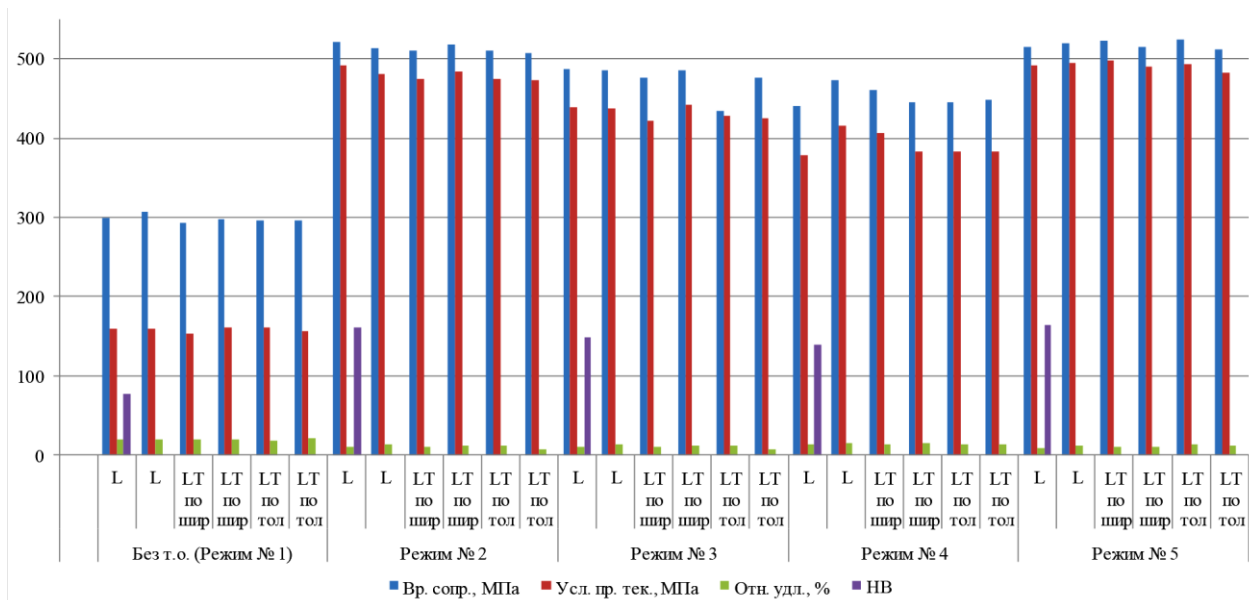


Рис. 7. Диаграмма, отражающая уровень механических свойств (МПа) в зависимости от времени выдержки I и II ступени старения

Таблица 2

Сравнение механических свойств темплета в зависимости от времени выдержки I и II ступеней старения

№ режима	Режим термообработки	Напр.	Вр. сопр., МПа	Усл. пр. тек., МПа	Отн. удл., %	НВ
ОСТ 1 90297-85		L	500–578	440–530	≥ 7	≥ 120
		LT	470–550	430–510	≥ 5	
		ST	460–530	–	$\geq 2,5$	
1.	Без т/о	L	300	160	19,5	77,2
		L	307	159	19,5	
		LT	294	154	19,6	
		LT	298	161	19,6	
		ST	297	161	17,9	
		ST	297	157	21,2	
2.	Старение: I ступень – выдержка 12 ч, II ступень – выдержка 5 ч	L	521	492	10,1	161
		L	514	481	13,8	
		LT	511	475	11,1	
		LT	519	485	11,6	
		ST	511	475	11,6	
		ST	507	473	6,6	
3.	Старение: I ступень – выдержка 12 ч, II ступень – выдержка 10 ч	L	487	440	10,1	148
		L	486	437	13,8	
		LT	476	423	11,1	148
		LT	486	442	11,6	
		ST	435	428	11,6	
		ST	477	426	6,6	
4.	Старение: I ступень – выдержка 12 ч, II ступень – выдержка 20 ч	L	441	378	13,7	139
		L	473	416	14,4	
		LT	461	406	13,6	
		LT	446	384	14,8	
		ST	446	384	13,7	
		ST	448	384	13	
5.	Старение: I ступень – выдержка 20 ч, II ступень – выдержка 5 ч	L	515	492	9,3	165
		L	520	495	12,5	
		LT	524	499	10,7	
		LT	516	490	10,2	
		ST	525	493	13,2	
		ST	513	483	12	

Здесь видно, что режим № 5 показал себя как оптимальный с позиции повышенного уровня значений механических свойств в зависимости от направления. Применение данного режима позволило не только выполнить требования ОСТ 1 90297-85, но и обеспечить запас механических свойств. Кроме того, режим № 5 позволил компенсировать неравномерность распределения степени деформации. Разница значений временного сопротивления в зависи-

мости от направления составила не более 0,5 %, условного предела текучести – 1,3 %, относительного удлинения – 17 %.

На рис. 8 представлена микроструктура темплета, термообработанного по режиму № 5 согласно табл. 2.

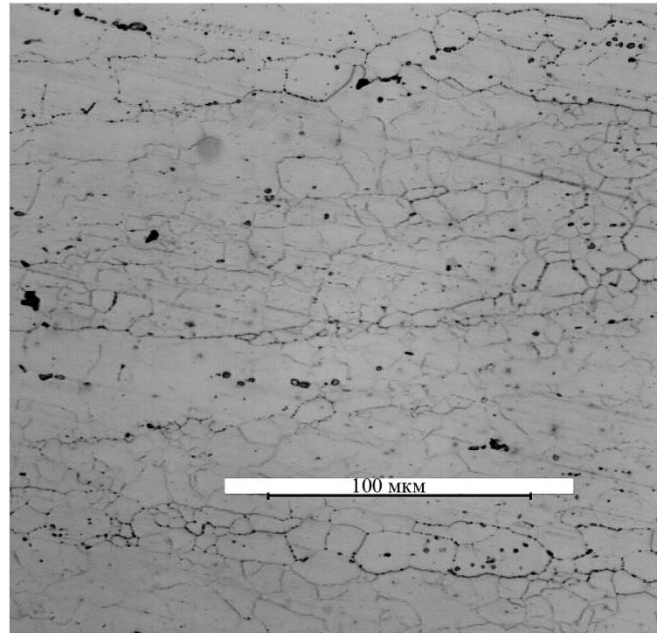


Рис. 8. Микроструктура темплета, термообработанного по режиму № 5 согласно табл. 2

Видно, что структура неоднородная бимодальная, со средним размером зерна 12 ± 1 мкм. Пористости на границах не обнаружено, наблюдаются мелкие рекристаллизованные зерна со средним размером 7 ± 1 мкм и крупные зерна удлиненной формы со средним размером 20 ± 1 мкм, что характерно для промышленных полуфабрикатов из сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu [18].

4. Заключение

По результатам проделанной работы сделаны выводы относительно распределения накопленной степени деформации, среднего напряжения и режимов термической обработки типовых штамповки из сплава 1933.

Посредством оценки компьютерной модели, соответствие реальному процессу которой подтверждено путем сравнения макроструктуры образца и распределения линий Лагранжа в аналогичном сечении штамповки, полученного после моделирования, установлено, что уровень накопленной степени деформации исследуемой детали после операции «окончательная штамповка» составляет 5,5–7, разница значений составляет 21 %, что говорит о неравномерном распределении. Однако уровня накопленной степени деформации достаточно для получения требуемых по стандарту механических свойств.

Посредством моделирования оценено распределение среднего нормального напряжения. Выявлено, что по объему штамповки оно имеет отрицательные значения уровня, достаточного для получения данной детали без трещин и разрушений того или иного вида.

Исследование времени выдержки I и II ступеней старения позволило определить его оптимальное сочетание значений, позволяющее получить требуемые механические свойства в зависимости от направления согласно ОСТ 1 90297-85, а также компенсировать неравномерность распределения степени деформации и получить достаточно равномерное распределение механических свойств в зависимости от направления (разница значений временного

сопротивления в зависимости от направления составила не более 0,5 %, условного предела текучести – 1,3 %, а относительного удлинения – 17 %). Кроме того, установлено, что увеличение времени выдержки I ступени старения и его уменьшение на II ступени приводит к повышению уровня механических свойств данной штамповки.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Давление» № 122021000032-5.

Литература

1. Фридляндер И. Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы. – М. : Металлургия, 1979. – 209 с.
2. Фридляндер И. Н. Алюминиевые сплавы в летательных аппаратах в периоды 1970–2000 и 2001–2015 гг. // Технология легких сплавов. – 2002. – № 4. – С. 12–17.
3. Антипов В. В., Ключкова Ю. Ю., Романенко В. А. Современные алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы // Авиационные материалы и технологии. – 2017. – № 5. – С. 195–211.
4. Исследование кинетики разрушения конструкционных алюминиевых сплавов при длительном воздействии статической нагрузки и коррозионной среды с использованием образца нового типа / Е. Н. Каблов, А. В. Гриневиц, А. Н. Луценко, В. С. Ерасов, Г. А. Нужный, И. В. Гулина // Деформация и разрушение материалов. – 2016. – № 10. – С. 42–48.
5. Развитие и применение высокопрочных сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu для авиакосмической техники / И. Н. Фридляндер, Е. А. Ткаченко, О. Г. Сенаторова, И. И. Молостова // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007 : юбилейный науч.-технич. сб. – М. : ВИАМ, 2007. – С. 155–163.
6. Исследование влияния режимов гомогенизации и закалки на структуру и механические свойства раскатных колец из сплава В95о.ч.-Т2 / Т. А. Нечайкина, Н. Е. Блинова, А. Л. Иванов, О. Ю. Козлова, А. Е. Кожекин // Труды ВИАМ. – 2018. – № 10. – С. 27–36.
7. Влияние закалки на остаточные деформации деталей летательных аппаратов из алюминиевых сплавов / А. С. Бачурин, К. Н. Бобин, К. А. Матвеев, Н. В. Курлаев // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2013. – № 3 (49). – С. 119–123.
8. Особенности закалки широких обшивочных плакированных листов из алюминиевого сплава В95п.ч. на линии непрерывной термической обработки / Т. А. Нечайкина, М. С. Оглодков, А. Л. Иванов, О. Ю. Козлова, С. И. Яковлев, М. А. Шляпников // Труды ВИАМ. – 2021. – № 11. – С. 25–33.
9. Обобщение опыта применения и оптимизация технологии изготовления полуфабрикатов их высокопрочного алюминиевого сплава 1933 для силовых конструкций современной авиационной техники / Р. О. Вахромов, Е. А. Ткаченко, О. И. Попова, Т. В. Милевская // Авиационные материалы и технологии. – 2014. – № 2. – С. 34–39.
10. Структура и свойства массивных поковок с пониженным уровнем остаточных напряжений из алюминиевого сплава 1933сб сбалансированного состава / А. И. Асташкин, В. В. Бабанов, А. А. Селиванов, Е. А. Ткаченко // Труды ВИАМ. – 2021. – № 7 (101). – С. 13–21. – DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-13-21.
11. Quench sensitivity and microstructure character of high strength AA7050 / P. Li, B. Xiong, Y. Zhang, Z. Li, B. Zhu, F. Wang, H. Liu // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2012. – Vol. 22 (2). – P. 268–274. – DOI: 10.1016/S1003-6326(11)61170-9.
12. Effect of processing parameters on quench sensitivity of an AA7050 sheet / X. Zhang, W. Liu, S. Liu, M. Zhou // Materials Science and Engineering, A. – 2011. – Vol. 528 (3). – P. 795–802. – DOI: 10.1016/j.msea.2010.07.033.

13. Li X. M., Starink M. J. Identification and analysis of intermetallic phases in overaged Zr-containing and Cr-containing Al–Zn–Mg–Cu alloys // *Alloys Compd.* – 2011. – Vol. 509 (2). – P. 471–476. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2010.09.064.
14. Influence of alloy composition and heat treatment on precipitate composition in Al–Zn–Mg–Cu alloys / T. Marlaud, A. Deschamps, F. Bley, W. Lefebvre, B. Baroux // *Acta Materialia.* – 2010. – Vol. 58 (1). – P. 248–260. – DOI: 10.1016/j.actamat.2009.09.003.
15. Влияние гомогенизационного отжига на структуру и свойства слитков из сплава 1933 системы Al–Zn–Mg–Cu / Р. О. Вахромов, Е. А. Ткаченко, Е. А. Лукина, А. А. Селиванов // *Труды ВИАМ.* – 2015. – № 11. – С. 3–11.
16. Галкин В. И., Головкина М. Г. Исследование влияния условий объемной горячей штамповки на формирование механических свойств изделий из алюминиевых сплавов // *Технология легких сплавов.* – 2016. – № 1. – С. 138–143.
17. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки: учебное пособие / А. В. Власов, С. А. Евсюков, С. А. Стебунов, Н. В. Биба, А. А. Шитиков. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. – 383 с.
18. Елагин В. И., Захаров В. В., Дриц М. М. Структура и свойства сплавов системы Al–Zn–Mg. – Москва : Металлургия, 1982. – 224 с.