

УДК 621.777.01

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-2-29-37>

Научная статья

Research article



Структурное состояние и деформации заготовки из алюминиевого сплава в начальной стадии прессования

Ю.Н. Логинов^{1,2}, А.В. Разинкин³, Г.В. Шимов¹, Т.В. Мальцева¹,
Н.И. Бушуева¹, Е.Г. Дымшакова³, Н.А. Калинина³

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

² Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН
620108, Россия, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

³ ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод»
623405, Россия, Свердловская обл., г. Каменск-Уральский, ул. Заводская, 5

✉ Георгий Викторович Шимов (G.v.shimov@urfu.ru)

Аннотация: Выявлены особенности строения зон недостаточной проработки металла в нестационарной стадии прессования. В условиях ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод» (Россия) на прессе номинальным усилием 120 МН выполнено прессование слитка из контейнера диаметром 800 мм с получением прутка диаметром 355,6 мм. Материал слитка – алюминиевый сплав АД33 (ГОСТ 4784) – аналог сплава 6061 по стандарту ASTM системы Al–Mg–Si. Относительное обжатие в таком процессе составляло 80 %, а коэффициент вытяжки – 5,06. Дальнейшее исследование включало изучение макроструктуры, микроструктуры вдоль радиальной координаты, определение среднего размера зерна вдоль радиальной координаты, испытания механических свойств при комнатной и повышенной температурах. Установлено, что макроструктура выходной части прутка – мелкозернистая, однородная, плотная, неметаллические и интерметаллидные включения отсутствуют. Однако по поперечному сечению выявлена разноструктурность: в центре структура демонстрирует слабодеформированное состояние, сохраняя рисунок строения дендритных ячеек, унаследованных от литья; на периферии структура имеет строчечное строение, ее составляющие малого размера и равномерно распределены. Получены значения прочностных свойств при повышенных температурах и выполнено сравнение с известными из литературы данными. Материал в опытах оказался прочнее почти в 2 раза, что говорит о его неполном разупрочнении. Также выполнено сравнение пластических свойств. В расчетной части с помощью программного модуля DEFORM-2D проведено численное моделирование прессования с малым коэффициентом вытяжки. Выявлено, что металл на периферии подвергается большей степени деформации с самого начала процесса. Отслеживание ситуации по шагам показало, что на первом шаге деформации локализованы вблизи отверстия матрицы, на втором – наблюдалось образование жесткой зоны в окрестности стыка матрицы и рабочей втулки контейнера. В периферийной области установился слой металла со степенью деформации 1,75–2,00. В то же время в центре этот диапазон снизился до 0,75–1,00, т.е. значения оказались практически в 2 раза меньше. На третьем шаге периферийный слой с повышенным уровнем деформации имеет клинообразную форму, на четвертом – периферийный (с повышенной степенью деформации) слой имеет равную толщину вдоль оси прессования, что говорит о наступлении стационарной стадии. Для переднего конца прутка на периферии показатель пластической деформации выше, чем для центральной части. Это подтверждает результаты структурного анализа, где было показано, что в центральной части может сохраняться литая структура, в то время как на периферии возникают все признаки наличия деформированного состояния. Таким образом, если возникает необходимость использования этой части заготовки в качестве материала с необходимым уровнем свойств, то придется применить технологическую операцию с увеличением накопленной степени деформации. При запланированной повторной обработке прессованием создаются условия для проработки областей металла, недостаточно деформированных при первичной обработке.

Ключевые слова: прессование, пластическая деформация, структура металла, неоднородность свойств, метод конечных элементов, численное моделирование

Благодарности: Исследования проведены в рамках выполнения проекта Российского научного фонда (№ 22-29-00931 от 20.12.2021).

Для цитирования: Логинов Ю.Н., Разинкин А.В., Шимов Г.В., Мальцева Т.В., Бушуева Н.И., Дымшакова Е.Г., Калинина Н.А. Структурное состояние и деформации заготовки из алюминиевого сплава в начальной стадии прессования. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2023;29(2):29–37. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-2-29-37>

Structure and strain state of aluminum bars at the initial phase of extrusion

Yu.N. Loginov^{1,2}, A.V. Razinkin³, G.V. Shimov¹, T.V. Maltseva¹,
N.I. Bushueva¹, E.G. Dymshakova³, N.A. Kalinina³

¹ Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin
19 Mira Str., Yekaterinburg 620002, Russia

² M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch
of Russian Academy of Sciences
18 S. Kovalevskaya Str., Yekaterinburg 620108, Russia

³ Kamensk Uralsky Metallurgical Works JSC
5 Zavodskaya Str., Sverdlovsk region, Kamensk-Uralsky 623405, Russia

✉ Georgy V. Shimov (G.v.shimov@urfu.ru)

Abstract: The structure of insufficiently deformed areas at the non-steady phase of extrusion was studied. The tests at Kamensk Uralsky Metallurgical Works using a 120 MN press and 800 mm dia. container, in order to extrude a 355.6 mm dia. Bar was performed. The bar material is the Al–Mg–Si AD33 aluminum alloy (GOST 4784), similar to ASTM 6061. The percentage reduction was 80 %, and the reduction ratio was 5.06. After that, the macrostructure, microstructure, and average grain size along the radius, mechanical properties at room and elevated temperatures were investigated. It was found that the extruded bar macrostructure is fine-grained, homogeneous, and dense, with no nonmetallic or intermetallic inclusions. The cross-section contained several structures. The central part is weakly deformed preserving the dendritic cell structure inherited from the casting. At the circumference, a streaked structure is formed. Its components are crushed and uniformly distributed. We measured the strength at elevated temperatures and compared the results to the data available in the literature. The tested material strength almost doubled, thus indicating its incomplete softening. The ductility was also performed. The DEFORM-2D software, in order to simulate the low reduction of extrusion was used. The metal at the circumference is exposed to a greater strain from the extrusion beginning. A step-by-step analysis indicated that at the first step, the strain is localized near the die hole. In the second step, a rigid area is formed in the vicinity of the die/container liner interface. The circumference layer of metal with a 1.75–2.00 reduction of area is formed. At the bar center, this range is 0.75–1.00 (half of the circumference value). In the third step, the circumference layer with an elevated strain has a wedge-like shape. In the fourth step, the circumference layer (with elevated strain) has an equal thickness along the extrusion axis. This indicates the steady phase. The plastic strain at the bar front end is higher at the circumference than in the center. This confirms the structural analysis results. They show that the central part of the bar may retain its cast structure, while the circumference is deformed. If the bar central part is required to have some specific properties, the bar has to undergo another manufacturing operation to increase the accumulated strain. Re-extrusion processes the areas insufficiently deformed during the first extrusion.

Keywords: extrusion, plastic strain, metal structure, heterogenic properties, finite element modeling, simulation

Acknowledgments: This study is part of the Russian Science Foundation project (No. 22-29-00931, dated 20.12.2021).

For citation: Loginov Yu.N., Razinkin A.V., Shimov G.V., Maltseva T.V., Bushueva N.I., Dymshakova E.G., Kalinina N.A. Structure and strain state of aluminum bars at the initial phase of extrusion. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2023;29(2):29–37.
<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-2-29-37>

Актуальность проблемы и цель работы

В промышленности легких сплавов, в том числе алюминиевых, прессование играет роль главного заготовительного процесса [1]. Это обусловлено тем, что номенклатура изделий в данной отрасли оказывается чрезвычайно велика, т.е. нужен процесс, который можно быстро перевести на производство другого изделия. Для этого в прессовом производстве часто необходимо сменить только один инструмент — матрицу. Обоснование применения именно прессования часто заключается в повышении уровня пластичности металла, что достигается реализацией схемы всестороннего неравномерного сжатия. Действительно, алюминиевые сплавы часто имеют невысокий уровень пластичности [2], и тогда прессование становится необходимым процессом [3, 4].

Вместе с тем для прессования характерна неоднородная картина распределения деформаций [5], особенно в начальный период процесса. Эту стадию принято называть нестационарной. Она начинается с заполнения металла контейнера пресса из-за выборки зазоров между металлом и инструментом [6, 7]. Далее происходит выдавливание через матрицу передней части прутка, и для этого этапа характерно постепенное увеличение уровня проникновения деформации внутрь металла. Однако для этого периода уровень сжимающих напряжений еще недостаточно велик, поэтому возможны проявления разрушения металла в виде появления трещин [8].

Наконец наступает стационарная стадия, когда поле деформаций стабилизируется, и можно надеяться на получение одинаковых свойств и структуры металла по длине прессуемого изделия [9], хотя по поперечному сечению скорее всего неоднородности останутся [10–12]. При этом на периферии пресс-изделия будет наблюдаться значительная деформация, что может привести к повышенной поврежденности и появлению трещин [13].

Один из вопросов, возникающих при рассмотрении такой последовательности событий, — насколько велика область нестационарности процесса, так как от этого зависит, какая часть металла может быть признана годной продукцией.

Оценке указанной ситуации посвящено не так много исследований, например можно отметить публикации [14, 15]. Выполнить оценку напряженно-деформированного состояния в реальных процессах прессования помогает метод конечных элементов [16, 17].

Целью настоящей работы являлось выявление особенностей строения зон недостаточной проработки металла в нестационарной стадии прессования.

Условия промышленного эксперимента

В условиях ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод» на прессе номинальным усилием 120 МН выполнено прессование слитка из контейнера диаметром 800 мм с получением прутка диаметром 355,6 мм. Материал слитка — алюминиевый сплав АД33 (ГОСТ 4784) — аналог сплава 6061 по стандарту ASTM системы Al—Mg—Si. Его требуемый химический состав следующий, мас. %: 0,8–1,20 Mg, 0,4–0,8 Si, 0,04–0,35 Cr, 0,15–0,40 Cu. В реальной плавке содержатся, мас. %: 1,0 Mg, 0,6 Si, 0,14 Cr, 0,19 Cu, 0,58 Fe, 0,10 Mn, 0,02 Zn и 0,06 Ti. Часть элементов представляют собой примеси в допустимом количестве.

Относительное обжатие в таком процессе равно 80 %, а коэффициент вытяжки — 5,06. Дальнейшее исследование включало:

- изучение макроструктуры;
- анализ микроструктуры вдоль радиальной координаты;
- определение среднего размера зерна вдоль радиальной координаты;
- испытания механических свойств при комнатной и повышенной температурах.

От переднего конца прутка отрезали поперечный темплет для изучения свойств и структуры. На рис. 1 представлена макроструктура металла

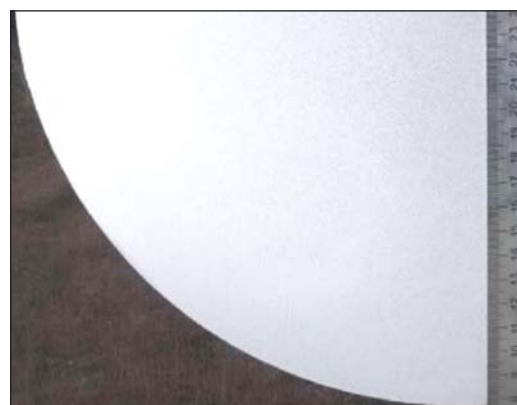


Рис. 1. Макроструктура выходной части прутка диаметром 355,6 мм (поперечное сечение, четверть темплета)

Fig. 1. The bar front end macrostructure, 355.6 mm dia. (1/4 cross-section)

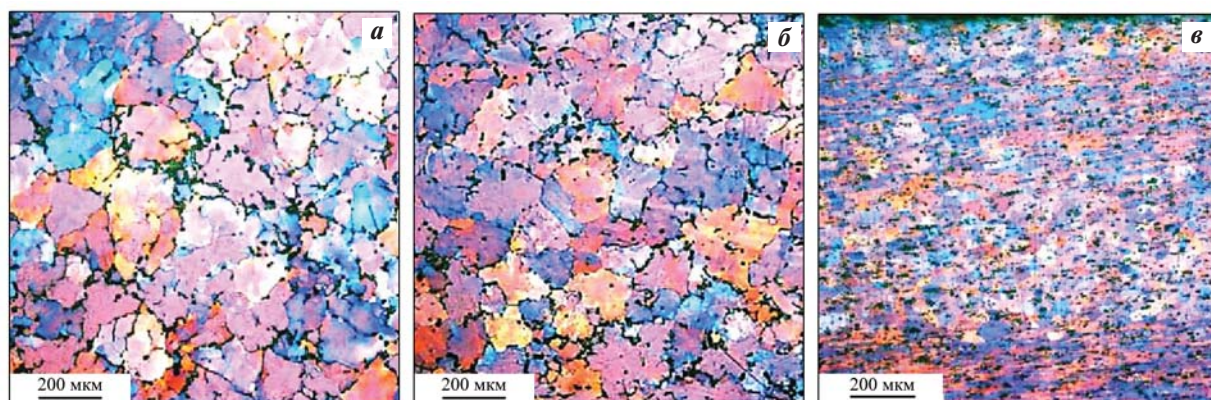


Рис. 2. Микроструктура в поляризованном свете прутка в центре (а), на половине радиуса (б) и на периферии (в)

Fig. 2. The bar microstructure in polarized light. Bar center (а), at half of the radius from the center (б), and the circumference (в)

на четверти поперечного сечения прутка. Выявлено, что макроструктура выходной части прутка мелкозернистая, однородная и плотная, неметаллических и интерметаллидных включений не наблюдалось.

Микроструктура выходного конца прутка плотная, неметаллических и интерметаллидных включений по сечению заготовки также не обнаружено. Однако по поперечному сечению выявлена разноструктурность:

- в центре структура (рис. 2, а) имеет вид слабodeформированного состояния, сохраняя рисунок строения дендритных ячеек, унаследованных от литья;

- на половине радиуса (рис. 2, б) ситуация повторяется;

- на периферии (рис. 2, в) структура строчечного строения, ее составляющие имеют измельченный вид и равномерное распределение.

Строчечное строение говорит о направленно-сти главной деформации удлинения (растяжения) вдоль оси прессования. В цилиндрической системе координат остальные главные деформации (тангенциальная и радиальная) являются деформациями укорочения (сжатия).

Средний размер зерна в центре прутка и на половине радиуса составил 190 мкм, а на периферии — 30 мкм, т.е. более чем в 6 раз меньше, что говорит о неравномерности проникновения деформации вдоль радиуса. Меньший размер зерна свидетельствует о наличии значительной деформации.

На рис. 3 приведена зависимость прочностных свойств от температуры испытаний. Здесь наблюдается большая разница между значениями временного сопротивления (σ_b) и условного предела

текучести ($\sigma_{0,2}$) при комнатной температуре, достигающая до 94 %, но уже при $t = 300^\circ\text{C}$ она резко падает. По мере повышения температуры прочностные свойства прогнозируемо снижаются.

Полученные значения прочностных свойств при повышенных температурах можно сравнить с известными из литературы. В работе китайских исследователей [18] приведены данные при статическом варианте испытаний (скорость деформации $0,001\text{ с}^{-1}$) для сплава марки 6061: при $t = 450^\circ\text{C}$ истинное напряжение состояния текучести оказалось равным 18 МПа. Это напряжение часто ассоциируют с условным пределом текучести в соответствии с методикой А.В. Третьякова — В.И. Зюзина [19]. Здесь видно, что материал в опытах оказался прочнее почти в 2 раза, что говорит о

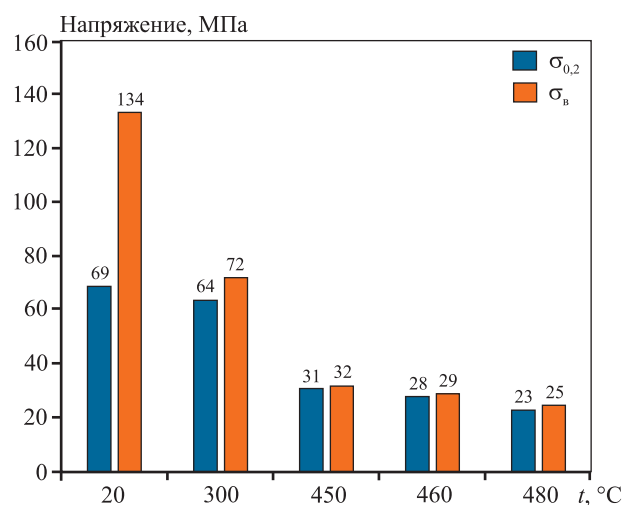


Рис. 3. Зависимость прочностных свойств от температуры испытаний

Fig. 3. Strength vs. test temperature curve

неполном его разупрочнении. В частности, авторы вышеупомянутой статьи предположили, что механизмом разупрочнения в диапазоне исследованных температур является не рекристаллизация, а динамический возврат (dynamic recovery).

Пластические свойства исследуемого сплава представлены на рис. 4. В отличие от прочностных показателей зависимость имеет немонотонный характер. В данном случае имеется возможность сравнить полученные значения с известными результатами для сплава АД33. Например, по данным электронного справочника matweb.com, для сплава 6061 (аналог АД33 по стандарту ASTM) в состоянии после отжига временное сопротивление равно 124 МПа, а условный предел текучести — 55 МПа. Полученные в опытах значения составили 134 и 69 МПа, что больше соответственно на 8 % и 25 %, т.е. прочностные свойства оказались выше регламентированных для отожженного состояния.

По данным вышеупомянутого справочника относительное удлинение до разрыва (ψ) для сплава должно составлять 30 %. В нашем эксперименте получено значение относительного удлинения $\delta = 19$ %, что меньше регламентированного на $100 \cdot (30 - 19) / 30 \approx 37$ %. Эти факты свидетельствуют о том, что после прессования передняя часть прутка находится в частично нагартованном состоянии, при этом степень нагартовки выше на периферии, что подтверждается, в том числе, большим измельчением зерен.

Имеется возможность использовать показатель относительного сужения для определения степени деформации сдвига до разрушения, а следовательно, и для построения диаграммы разрушения [20].

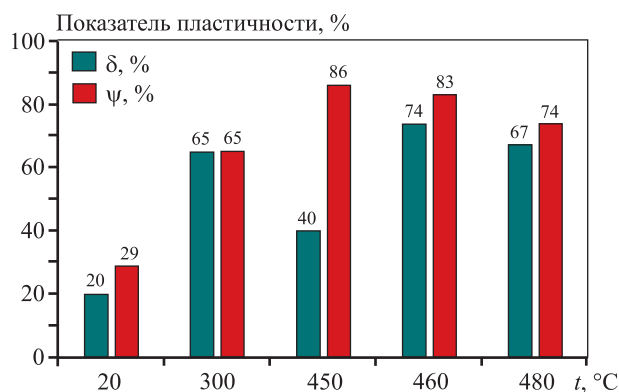


Рис. 4. Показатели пластичности передней части прутка в зависимости от температуры испытаний

Fig. 4. The bar front end ductility vs. test temperature

Как видно из рис. 4, относительное сужение резко возрастает при нагреве металла: уже при $t = 300$ °C оно составляет 65 % и остается высоким (74–86 %) при температурах 450–480 °C. Это создает возможность последующей пластической обработки металла без разрушения. Предполагается, что передняя отпрессованная часть прутка будет подвергнута на следующей стадии повторному прессованию. В этом случае за счет высокой степени деформации, характерной для прессования, произойдет дополнительная проработка структуры и будет получено готовое изделие.

Расчетная часть

Последний вывод можно подтвердить результатами численного моделирования поведения металла при прессовании с малым коэффициентом вытяжки. Был применен программный модуль DEFORM-2D. Напряженно-деформированное состояние задано осесимметричным. Тепловые граничные условия максимальным образом приближены к производственным показателям:

- температура слитка — 470 °C;
- температура контейнера — 450 °C;
- температура матрицы и пресс-шайбы — 380 °C;
- температура окружающей среды при выходе из матрицы — 20 °C;
- коэффициент конвекции в окружающую среду — 0,02 Н/с/мм/°C;
- коэффициент теплопередачи — 11 Н/с/мм/°C.

Коэффициенты и их размерности заимствованы из интерфейса программного модуля.

Скорость движения пресс-штемпеля составляла 3,7 мм/с. Граничные условия заданы законом Зибеля при показателе трения, равном 0,7, что обусловлено высоким уровнем нормальных напряжений, характерным для прессования. Диаметры контейнера и матрицы назначены соответственно 800 мм и 355,6 мм, как и в варианте промышленного эксперимента. Более подробно постановка подобной задачи описана в публикации [21].

На рис. 5 приведены результаты решения в виде областей равного уровня степени деформации. Действительно, металл на периферии подвергается большей деформации с самого начала процесса прессования. Это происходит потому, что передняя часть заготовки выпрессовывается первоначально, как не подвергнутая деформации жесткая пробка диаметром, равным диаметру отверстия матрицы. Затем степень

деформации нарастает по объему пресс-изделия. Но процесс этот постепенный и растянут во времени.

Эта последовательность показана с пошаговым разделением на рис. 5, а–г и при сохранении постоянной цветовой шкалы степени деформации на рис. 5, д.

На первом шаге (рис. 5, а) деформации локализованы вблизи отверстия матрицы, на втором (рис. 5, б) — показано образование мертвой (жесткой) зоны в окрестности стыка матрицы и рабочей втулки контейнера. В периферийной области установился слой металла со степенью деформации в диапазоне 1,75–2,00. В то же время в центре этот

диапазон значений оказывается на уровне 0,75–1,00, т.е. практически в 2 раза меньше.

На третьем шаге (рис. 5, в) периферийный слой с повышенным уровнем деформации имеет клинообразную форму, что говорит об увеличении его толщины, т.е. стационарная стадия процесса еще не наступила. Соотношение длины отпрессованного прутка к его диаметру здесь равно 2. Но уже на четвертом шаге периферийный (с повышенной степенью деформации) слой имеет равную толщину вдоль оси прессования, что свидетельствует о наступлении стационарной стадии. Степень деформации в центре теперь находится в интервале 1,00–1,25.

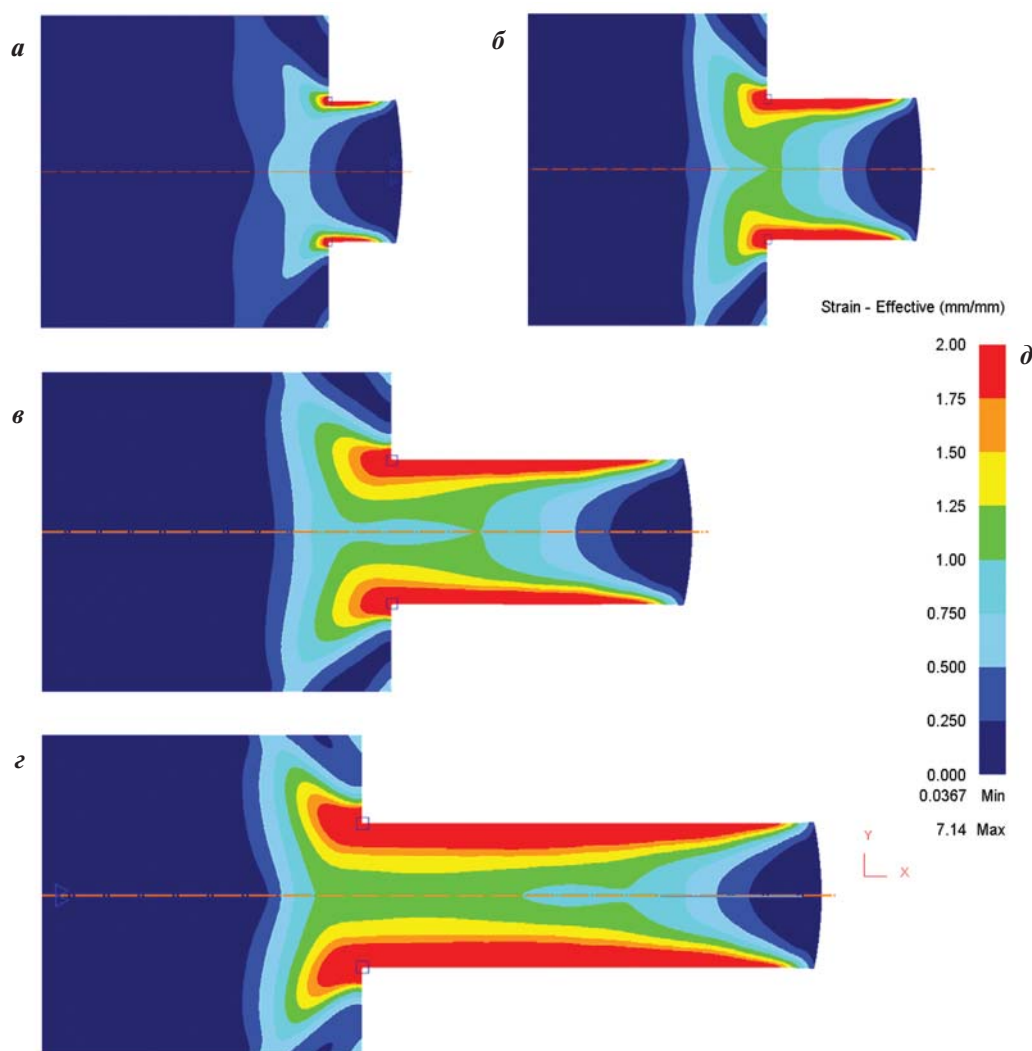


Рис. 5. Изменение картины распределения степени деформации по мере выдавливания переднего конца прутка на относительную длину (отношение его длины к диаметру)

а – 0,5, б – 1,0, в – 2,0, з – 3,0, д – цветовая шкала степени деформации strain effective

Fig. 5. Strain distribution vs. the bar front end relative extruded length (length to diameter ratio)

а – 0.5, б – 1.0, в – 2.0, з – 3.0, д – effective strain color scale

Если рассчитать степень деформации как логарифм коэффициента вытяжки (т.е. логарифм соотношения площадей заготовки и пресс-изделия), то получим значение 0,7. Некоторое превышение степени деформации при расчете методом конечных элементов связано с учетом сдвиговых деформаций, что не учитывает коэффициент вытяжки.

В целом анализ цветовых уровней на диаграммах показывает, что для переднего конца прутка действует правило, свойственное стационарной стадии: на периферии показатель пластической деформации выше, чем в центральной части [22]. Это, в частности, подтверждает вышеприведенные результаты структурного анализа, где было показано, что в центральной части прутка может сохраняться литая структура, в то время как на периферии наблюдаются все признаки наличия деформированного состояния.

Таким образом, если возникает необходимость использования центральной части заготовки в качестве материала с необходимым уровнем свойств, то придется применить технологическую операцию с увеличением накопленной степени деформации.

Заключение

Выполненный структурный анализ передней части горячепрессованной заготовки из алюминиевого сплава 6061 показал, что в этой зоне наблюдается неоднородность распределения зерен по размеру. Центральная часть характеризуется крупным зерном, в то время как по мере перемещения к периферии его размер уменьшается.

Испытания образцов в горячем состоянии выявили достаточно высокие пластические свойства материала передней части отпрессованного прутка, что позволяет выполнить его повторную обработку давлением (прессованием), при которой создаются условия для проработки областей металла, недостаточно деформированных при первичном формоизменении.

Список литературы/References

1. Bauser M., Sauer G., Siegert K. Extrusion. 2nd Ed. Ohio: ASM International, 2006.
2. Sukunthakan Ngernbamrung, Yudai Suzuki, Norio Takatsuji, Kuniaki Dohda. Investigation of surface cracking of hot-extruded AA7075 billet. *Procedia Manufacturing*. 2018;15:217–224. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.212>
3. Логинов Ю.Н. Прессование как метод интенсивной деформации металлов и сплавов. Екатеринбург: УрФУ, 2016. 156 с.
4. Mayén J., Abúndez A., Pereyra I., Colín J., Blanco A., Serna S. Comparative analysis of the fatigue short crack growth on Al 6061-T6 alloy by the exponential crack growth equation and a proposed empirical model. *Engineering Fracture Mechanics*. 2017;177:203–217. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.03.036>
5. Shinobu Kaneko, Kenji Murakami, Tetsuo Sakai. Effect of the extrusion conditions on microstructure evolution of the extruded Al–Mg–Si–Cu alloy rods. *Materials Science and Engineering: A*. 2009; 500:8–15. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.09.057>
6. Телешов В.В., Снегирева Л.А., Захаров В.В. О влиянии некоторых технологических факторов на структуру и свойства крупногабаритных прессованных полуфабрикатов. *Технология легких сплавов*. 2022;1:10–21. (In Russ).
Teleshov V.V., Snegireva L.A., Zakharov V.V. On the influence of some technological factors on the structure and properties of large-sized pressed semi-finished products. *Tekhnologiya legkikh splovov*. 2022;1:10–21. (In Russ).
7. Логинов Ю.Н., Дегтярева О.Ф. Влияние стадии распрессовки полого слитка из алюминиевого сплава на процесс последующего прессования. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2007;7:37–42.
Loginov Yu.N., Degtyareva O.F. Influence of the stage of pressing out of a hollow aluminum alloy ingot on the process of subsequent pressing. *Kuznechno-shtampovnoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniyem*. 2007;7:37–42. (In Russ).
8. Логинов Ю.Н., Антоненко Л.В. Изучение напряженно-деформированного состояния для предупреждения образования продольных трещин в прессованных трубах. *Цветные металлы*. 2010;5:119–122.
Loginov Yu.N., Antonenko L.V. Study of the stress-strain state to prevent the formation of longitudinal cracks in pressed pipes. *Tsvetnyye metally*. 2010;5:119–122. (In Russ).
9. Данилин А.В., Данилин В.Н., Романцев Б.А. Прогнозирование вида структуры после прессования в изделиях из труднодеформируемых алюминиевых сплавов на основании результатов математического моделирования. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2019;1:26–38.
Danilin A.V., Danilin V.N., Romantsev B.A. Predicting the type of structure after pressing in products made of hard-to-form aluminum alloys based on the results of ma-

- thematical modeling. *Kuznechno-shtampovoychnoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniyem*. 2019;1:26–38. (In Russ).
10. Nadja Berndt, Philipp Frint, Marcus Böhme, Sören Müller, Martin F.-X. Wagner. On radial microstructural variations, local texture and mechanical gradients after cold extrusion of commercially pure aluminum. *Materials Science and Engineering: A*. 2022;850:143496. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143496>
 11. Lin G., Song W., Feng D., Li K., Feng Y., Liu J. Study of microstructure and mechanical property heterogeneity throughout the wall thickness of high strength aluminum alloy thick-wall pipe. *Journal of Materials Research*. 2019;34(15);2736–2745. <https://doi.org/10.1557/jmr.2019.127>
 12. Kai Zhang, Knut Marthinsen, Bjørn Holmedal, Trond Aukrust, Antonio Segatori. Through thickness variations of deformation texture in round profile extrusions of 6063-type aluminium alloy: Experiments, FEM and crystal plasticity modelling. *Materials Science and Engineering: A*. 2018;722:20–29. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.02.081>
 13. Ridha Hambli, Daniel Badie-Levet. Damage and fracture simulation during the extrusion processes. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2000;186(1):109–120. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(99\)00109-7](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(99)00109-7)
 14. Бережной В.Л. Анализ и формализация представлений о неравномерности деформации для технологического развития прессования. *Технология легких сплавов*. 2013;1:40–57.
Berezhnoy V.L. Analysis and formalization of ideas about the unevenness of deformation for the technological development of pressing. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2013;1:40–57. (In Russ).
 15. Li J., Wu X., Liao B., Cao L. Simulation of dynamic recrystallization in an Al–Mg–Si alloy during inhomogeneous hot deformation. *Materials Today Communications*. 2021;29:102810. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102810>
 16. Zhi Peng and Terry Sheppard. A study on material flow in isothermal extrusion by FEM simulation. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. 2004;12(5):745–763. <https://doi.org/10.1088/0965-0393/12/5/001>
 17. Kai Zhang, Knut Marthinsen, Bjørn Holmedal, Trond Aukrust, Antonio Segatori. Through thickness variations of deformation texture in round profile extrusions of 6063-type aluminium alloy: Experiments, FEM and crystal plasticity modelling. *Materials Science and Engineering: A*. 2018;722:20–29. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.02.081>
 18. Wei Chen, Ying-ping Guan, Zhen-hua Wang. Hot deformation behavior of high Ti 6061 Al alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2016;26(2):369–377. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64129-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64129-8)
 19. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. М.: Металлургия, 1973. 224 с.
 20. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением: М.: Металлургия, 1986. 687 с.
 21. Loginov Yu.N., Shimov G.V., Bushueva N.I. Deformations in the nonstationary stage of aluminum alloy rod extrusion process with a low elongation ratio. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*. 2022;24(2):39–49. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2022-24.2-39-49>
 22. Hongmei Che, Xianquan Jiang, Nan Qiao, Xiaokui Liu. Effects of Er/Sr/Cu additions on the microstructure and mechanical properties of Al–Mg alloy during hot extrusion. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017;708:662–670. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.01.039>

Информация об авторах

Юрий Николаевич Логинов — д.т.н., профессор кафедры «Обработка металлов давлением», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ); вед. науч. сотрудник Института физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН. <https://orcid.org/0000-0002-7222-2521>
E-mail: J.n.loginov@urfu.ru

Александр Викторович Разинкин — к.т.н., директор по технологии, ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод» (ОАО «КУМЗ»).
E-mail: RazinkinAV@kumz.ru

Information about the authors

Yuri N. Loginov — Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department “Metal Processing by Pressure”, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU); Leading Research Scientist, Institute of Metal Physics named after M.N. Mikheev of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. <https://orcid.org/0000-0002-7222-2521>
E-mail: J.n.loginov@urfu.ru

Alexander V. Razinkin — Cand. Sci. (Eng.), Director of Technology, Kamensk Uralsky Metallurgical Works JSC (JSC “KUMZ”).
E-mail: RazinkinAV@kumz.ru

Георгий Викторович Шимов — к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением», УрФУ.

<https://orcid.org/0000-0001-5763-0837>

E-mail: G.v.shimov@urfu.ru

Татьяна Викторовна Мальцева — к.т.н., доцент кафедры материаловедения, УрФУ.

E-mail: For_mtv01@mail.ru

Наталья Игоревна Бушуева — инженер-исследователь научной лаборатории «Обработка металлов давлением», УрФУ.

<https://orcid.org/0000-0002-0603-8785>

E-mail: N.i.bushueva@urfu.ru

Елена Геннадьевна Дымшакова — начальник центральной заводской лаборатории ОАО «КУМЗ».

E-mail: Dymshakovaeg@kumz.ru

Наталья Александровна Калинина — инженер-технолог ОАО «КУМЗ».

E-mail: Kalinina_NA@mail.ru

Georgy V. Shimov — Cand. Sci. (Eng.), Ass. Professor of the Department “Metal Processing by Pressure”, UrFU.

<https://orcid.org/0000-0001-5763-0837>

E-mail: G.v.shimov@urfu.ru

Tatiana V. Maltseva — Cand. Sci. (Eng.), Ass. Professor of the Department of Materials Science, UrFU.

E-mail: For_mtv01@mail.ru

Natalia I. Bushueva — Research Engineer of the Scientific Laboratory “Metal Processing by pressure”, UrFU.

<https://orcid.org/0000-0002-0603-8785>

E-mail: N.i.bushueva@urfu.ru

Elena G. Dymshakova — Head of the Central Factory Laboratory, JSC “KUMZ”.

E-mail: Dymshakovaeg@kumz.ru

Natalia A. Kalinina — Process Engineer, JSC “KUMZ”.

E-mail: Kalinina_NA@mail.ru

Вклад авторов

Ю.Н. Логинов — формирование основной концепции, постановка цели и задачи исследования, подготовка текста, формулировка выводов.

А.В. Разинкин — организация сбора производственных параметров и их анализ, корректировка связей между производственными наблюдениями и расчетными данными.

Г.В. Шимов — постановка задачи вычислительного эксперимента, анализ решения этой задачи.

Т.В. Мальцева — установление связей между металлографическими исследованиями и механическими свойствами.

Н.И. Бушуева — проведение расчетов методом конечных элементов, построение связей между расчетными параметрами.

Е.Г. Дымшакова — постановка задач металлографического анализа, его проведение и обработка результатов.

Н.А. Калинина — обработка наблюдений в производственном процессе, упорядочение полученных данных.

Contribution of the authors

Yu.N. Loginov — formation of the main concept, setting the goal and objectives of the study, preparation of the text, formulation of conclusions.

A.V. Razinkin — organizing the collection of production parameters and their analysis, adjusting the links between production observations and calculated data.

G.V. Shimov — statement of the problem of a computational experiment and analysis of the solution of this problem.

T.V. Maltseva — establishing links between metallographic studies and mechanical properties.

N.I. Bushueva — carrying out calculations by the finite element method, building relationships between the calculated parameters.

E.G. Dymshakova — setting the tasks of metallographic analysis, its implementation and processing of results.

N.A. Kalinina — processing of observations in the production process, streamlining these data.

Статья поступила в редакцию 21.02.2023, доработана 14.03.2023, подписана в печать 16.03.2023

The article was submitted 21.02.2023, revised 14.03.2023, accepted for publication 16.03.2023