



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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









Деформации в нестационарной стадии прессования прутка из алюминиевого сплава с малым коэффициентом вытяжки

Юрий Логинов^{1, 2, а, *}, Георгий Шимов^{1, b}, Наталья Бушуева^{1, c}

¹ Уральский Федеральный университет, ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620002, Россия

² Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, ул. Софьи Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620137, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0002-7222-2521>,  j.n.loginov@urfu.ru, ^b  <http://orcid.org/0000-0001-5763-0837>,  g.v.shimov@urfu.ru,

^c  <https://orcid.org/0000-0002-0603-8785>,  m0rgondagen@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.777.01

История статьи:

Поступила: 21 марта 2022

Рецензирование: 21 апреля 2022

Принята к печати: 29 апреля 2022

Доступно онлайн: 15 июня 2022

Ключевые слова:

Прессование

Алюминиевый сплав

Метод конечных элементов

Пластическая деформация

Обработка металлов давлением

Финансирование:

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, соглашение 22-29-00931 от 20.12.2021.

Благодарности:

Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов».

АННОТАЦИЯ

Введение. Отмечено, что прессование является основным заготовительным процессом в обработке давлением алюминиевых сплавов. При этом сам процесс обладает таким недостатком, как нестационарность пластического течения металла. **Целью работы** является установление уровня деформационной неоднородности передней части отпрессованного прутка путем численного моделирования с применением метода конечных элементов. Задачами исследования являются формулировка граничных условий процесса прессования, получение решения и оценка степени неоднородности. **Методы исследования:** для оценки деформированного состояния изделия применили метод конечных элементов. Последовательность действий включала создание начальной формы очага деформации и конфигурации инструмента. Взаимное перемещение инструмента и деформируемого материала задано с помощью соответствующих граничных условий. Деформируемая среда – пластический материал со степенным упрочнением, физико-механические свойства соответствуют алюминиевому сплаву серии 6000. **Результаты и обсуждение.** Выявлено, что степень деформации в передней части отпрессованного изделия распределена крайне неравномерно, различия зафиксированы выше 300 %. Построены зависимости распределения степени деформации в поперечных сечениях прутка в зависимости от расстояния от переднего торца при различных относительных радиальных координатах. Выявлено, что центральные слои прутка приобретают постоянный уровень степени деформации раньше, чем периферийные слои, т. е. для них стационарность процесса достигается при меньшем перемещении металла. **Областью применения результатов** работы является технологическая проработка рационального раскрытия металла на финишной стадии прессового передела алюминиевых сплавов с целью более рационального использования возвратных отходов. **Выводы.** В процессе прессования с малым коэффициентом вытяжки степень деформации распределяется неравномерно как по поперечному сечению пресс-изделия, так и по его длине. В нестационарной начальной стадии прессования передняя часть прутка остается слабо деформированной как на периферии, так и в центре, что часто вынуждает отправлять ее на переплав вследствие недостаточно проработанной структуры металла. В то же время, если установить ограничения на минимально возможную степень деформации, то по результатам расчета методом конечных элементов можно установить минимальную длину удаляемого металла, за счет чего удастся снизить массу отходов, направляемых в переплав.

Для цитирования: Логинов Ю.Н., Шимов Г.В., Бушуева Н.И. Деформации в нестационарной стадии прессования прутка из алюминиевого сплава с малым коэффициентом вытяжки // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 2. – С. 39–49. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-39-49.

Введение

Наряду с горячей листовой прокаткой прессование является одним из основных заготовительных видов обработки в производстве полуфабрикатов из алюминия и его сплавов [1, 2].

*Адрес для переписки

Логинов Юрий Николаевич, д.т.н., профессор
 Уральский Федеральный университет,
 ул. Мира, 19,
 620002, г. Екатеринбург, Россия
 Тел.: 8 (343) 375-44-37, e-mail: j.n.loginov@urfu.ru

Сам процесс отличается повышенной гибкостью: для перехода на выпуск другого вида изделия часто достаточно применить смену матрицы. Такой быстроты не удастся достичь при использовании процесса прокатки, где придется менять целые комплекты валков. Дополнительно именно в случае обработки алюминиевых сплавов, в отличие, например, от обработки меди или стали, становится возможным вести процесс деформации при умеренных температу-

рах. В результате инструментальная оснастка сохраняет прочностные свойства, даже если ее нагреть до температуры деформации. Это выводит процесс на уровень изотермической обработки, что должно стабилизировать свойства конечного продукта.

Вместе с тем прессование отличается повышенными отходами металла в виде отрезанных передней и задней частей отпрессованного профиля. Они отбраковываются по причине иного деформированного состояния, чем основная часть изделия [3]. Например, для задней части отпрессованного профиля характерно образование пресс-утяжины, в результате чего появляется дефектность изделия [4, 5].

Для передней части профиля характерен малый уровень пластической деформации, что приводит к не проработке литой структуры металла. В результате механические свойства оказываются в этом месте невелики и часто не соответствуют требованиям стандарта. Кроме того, стандартами, особенно на продукцию из алюминиевых сплавов авиационного назначения, диктуются требования по структурному состоянию металла, которые также могут оказаться не выполнены. Неравномерность структуры и свойств прессованных полуфабрикатов по длине и по поперечному сечению является предметом изучения технологических служб предприятий и исследовательских учреждений [6, 7].

Поведение передней части прессуемого изделия происходит в условиях осуществления малых пластических деформаций. Если при этом запланировано прессование с заранее уменьшенными коэффициентами вытяжки, то эффект от двух этих явлений суммируется и приходится принимать во внимание их последствия. Сам процесс прессования с малыми коэффициентами вытяжек анализировался, например, авторами [8] для случая прессования алюминиевого сплава. При этом обсуждалась проблема возможного снижения коэффициентов вытяжек за счет применения слитков меньших поперечных сечений. Поскольку при этом снижается уровень пластической деформации, то уменьшаются и энергетические затраты. Однако при этом остается актуальным вопрос доведения пластической деформации до таких величин, чтобы необходимые свойства продукта были получены. Отсюда возникает проблема достижения оптимальной

величины деформации, которая устроила бы и экономику процесса со стороны минимизации энергетических затрат, и получение продукции необходимого качества. В результате даже начали появляться технические решения, направленные на искусственное увеличение степени деформации при прессовании, по крайней мере, магниевых сплавов [9].

Другая причина неудовлетворительных свойств передних частей пресс-изделий состоит в возможности их растрескивания после выхода из отверстия матрицы. Дело в том, что напряженное состояние металла, находящегося вблизи матрицы, отличается от состояния металла, находящегося в контейнере пресса. В последнем случае окажется напряженное состояние всестороннего сжатия [10], повышающее пластичность металла. Однако металл напротив отверстия матрицы имеет свободную поверхность и на него не действуют напряжения подпора. Поскольку пластичность металла является функцией напряженного состояния, то при отсутствии напряжений сжатия пластичность оказывается пониженной, и для недостаточно пластичных сплавов алюминия возможно появление трещин именно на передней части выходящего из матрицы пресс-изделия, что показано в работе [11] на примере производства крупногабаритных труб. При переходе в стационарную стадию прессования эффект отсутствия переднего подпора пропадает, и изделие перестает разрушаться.

Поэтому определение деформированного состояния передней выходной части прессованного изделия, особенно в условиях деформации с малыми коэффициентами вытяжек, является актуальной задачей.

Для анализа напряженно-деформированного состояния при прессовании может применяться физическое моделирование [12], но в последнее время чаще всего используют метод конечных элементов, реализованный в различных программных продуктах: QFORM [13,14], FORGE [15], DEFORM [16-18], РАПИД [19] и др. Это позволяет оценить ситуацию в каждой элементарной точке деформируемого металла. При этом возможно учесть все многообразие свойств деформируемых материалов и граничных условий в производственных ситуациях.

Целью работы является установление уровня деформационной неоднородности передней

части отпрессованного прутка путем численного моделирования с применением метода конечных элементов.

Методики исследования

Процесс прямого прессования осуществляется продавливанием металла слитка 1, расположенного в контейнере пресса 2, усилием пуансона 3 через отверстие матрицы 4 (рис. 1). В результате на выходе матрицы вначале появляется передняя часть прутка 5, затем наступает стационарная стадия процесса и выдавливается весь слиток за исключением пресс-остатка.

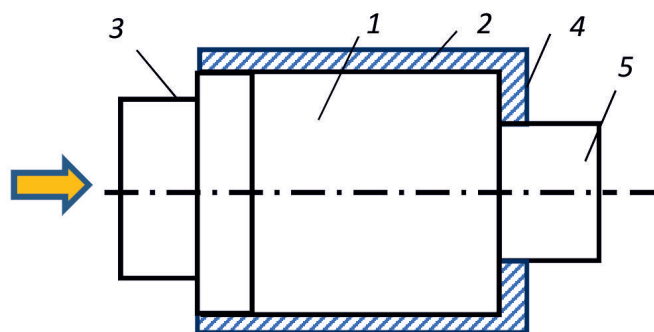


Рис. 1. Схема прямого прессования:

1 – слиток; 2 – контейнер; 3 – пуансон с пресс-шайбой; 4 – матрица; 5 – передняя часть прутка; стрелка – направление перемещения инструмента

Fig. 1. Scheme of direct extrusion:

1 – ingot; 2 – container; 3 – punch with a pressure pad; 4 – die; 5 – the front of the rod; arrow – direction of tool motion

Можно обратить внимание на то, что схема отображает деформацию металла с малым обжатием, что не является характерным для процесса прессования, где коэффициенты вытяжек достигают до 1000 и более. В теории прессования рассматривается вопрос о назначении коэффициентов вытяжек не менее пяти для полуфабрикатов, предназначенных для последующей обработки давлением (первый вариант), и не менее десяти для полуфабрикатов, не обрабатываемых впоследствии давлением (второй вариант). Такие ограничения обусловлены возможностью не проработки сердцевины пресс-изделия из-за локализации пластической деформации в периферийных слоях [20].

Для пересчета коэффициентов вытяжек λ в иные показатели деформации, а также для

связи между ними предусмотрены следующие формулы:

– для относительного обжатия по площади:

$$\varepsilon_{\%} = 100 (\lambda - 1) / \lambda; \quad (1)$$

– для степени деформации (иногда называемой логарифмической деформацией):

$$\varepsilon = \ln \lambda \quad (2)$$

либо

$$\varepsilon = -\ln (1 - \varepsilon_{\%} / 100). \quad (3)$$

Расчет по формулам (1) и (2) дает минимальные значения: $\varepsilon_{\%} = 80 \%$, $\varepsilon = 1,61$ – для первого варианта и $\varepsilon_{\%} = 90 \%$, $\varepsilon = 2,30$ – для второго варианта. Здесь видно, что несмотря на то что значения коэффициентов вытяжек минимальны, показатели деформации оказываются большими и часто они недостижимы в отдельных проходах прокатки как альтернативного процесса.

Процесс прессования осуществляется на горизонтальных гидравлических прессах. Прессовый инструмент в виде пресс-шайбы и матрицы подогревают до 380°C в отдельно стоящей печи и монтируют в линии прессования. Температура контейнера 450°C стабилизирована устройством подогрева. После выхода из матрицы прутки попадают на стеллаж пресса, а затем подвергаются резке на мерные длины, при этом передняя часть прутка отделяется, ее структура металла считается недостаточно проработанной пластической деформацией.

Существуют общие рекомендации в прессовом производстве, на основе которых дефектной признается передняя часть отпрессованного пресс-изделия на длине, примерно равной двум диаметрам. Например, при диаметре отпрессованного крупногабаритного прутка 360 мм придется вырезать переднюю часть длиной 720 мм и массой 198 кг. При массе исходного слитка на уровне 2 т отходы указанного типа составляют величину около 10 %. Такие большие отходы возникают именно при прессовании с малыми коэффициентами вытяжки, поскольку длина получаемого прутка оказывается небольшой и на ее фоне доля отрезаемого металла оказывается значительной.

На рис. 2, а показана передняя часть прутка на выходе из матрицы, а на рис. 2, б – поверхности реза прутков.



Рис. 2. Передняя часть прутка на выходе из матрицы (а) и поверхности реза прутков (б)
Fig. 2. The front of the rod at the exit of the die (a) and the cutting surface of the rods (b)

Для оценки ситуации, возникающей на начальной стадии прессования, применен программный модуль DEFORM-2D и сформулирована следующая постановка краевой задачи. Напряженно-деформированное состояние является осесимметричным, материал прессового инструмента – абсолютно жесткий, материал слитка рассматривается как пластичный.

Заданы параметры вычислительной постановки: количество элементов сетки – 26 000, размер элемента в объеме слитка 1,0...1,2 мм; вблизи инструмента 0,5...0,7 мм.

Тепловые граничные условия максимальным образом приближены к производственным показателям: температура слитка 470 °С; температура контейнера 450 °С; температура матрицы и пресс-шайбы 380 °С; температура окружающей среды при выходе из матрицы 20 °С; коэффициент конвекции в окружающую среду 0,02 Н/с/мм/°С; коэффициент теплопередачи 11 Н/с/мм/°С. Коэффициенты и их размерности заимствованы из интерфейса программного модуля.

Скоростные граничные условия также привязаны к производственной обстановке: скорость движения пресс-штемпеля равна 3,66 мм/с, остальной прессовый инструмент неподвижен. Граничные условия трения в отличие от прокатки, где применяется закон Кулона, заданы законом Зибеля при показателе трения,

равном 0,7 [21], что обусловлено высоким уровнем нормальных напряжений, характерным для прессования [22, 23]

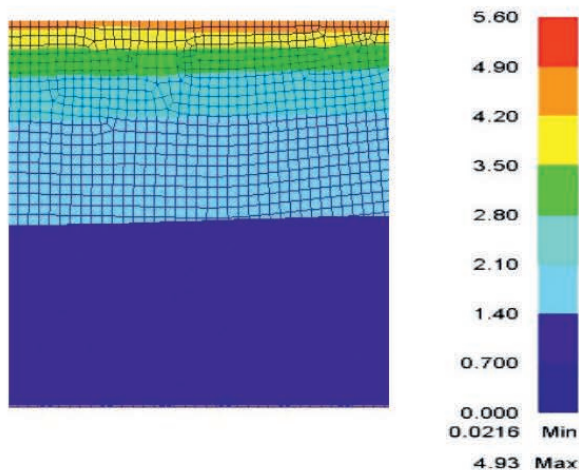
Диаметр контейнера равен 800 мм, диаметр матрицы 355,6 мм, коэффициент вытяжки в этом процессе равен 5,06, т. е. это случай прессования с малым обжатием. В соответствии с формулами (1) и (2) можно оценить другие показатели деформации: $\varepsilon = 1,62$, $\varepsilon_{\%} = 80 \%$.

Свойства деформируемой среды описываются моделью из интерфейса программы AL6061 Machining-Johnson: диапазон степени деформации (strain) 0...5; диапазон скорости деформации (strain rate) 0...100 000 с⁻¹; диапазон температур 20...550 °С. Дополнительно эти данные сверены со свойствами, приведенными в источнике [24].

Результаты и их обсуждение

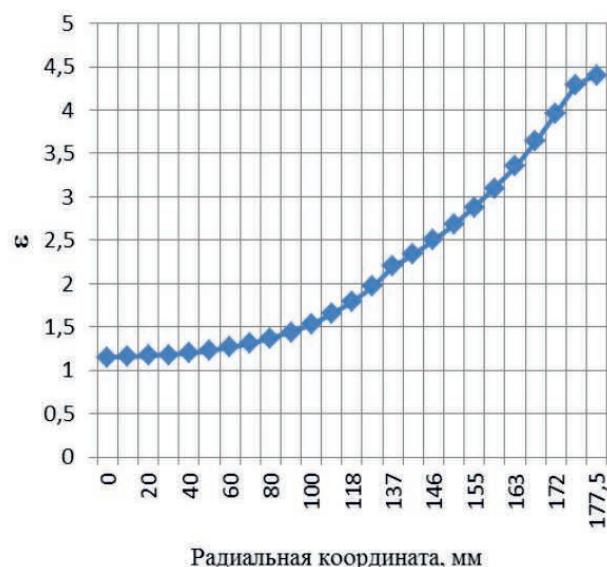
На рис. 3, а отображен результат решения задачи в виде областей равного уровня степени деформации в стационарной стадии прессования для продольного сечения прутка. Соответственно на рис. 3, б представлен график распределения степени деформации вдоль радиальной координаты r . Здесь видно, что степень деформации распределяется неравномерно: в центре прутка степень деформации равна 1,1, а на периферии 4,5, отличие составляет $100(4,5...1,1)/1,1 = 309 \%$.

Наружная поверхность прутка



Ось прутка

а



б

Рис. 3. Распределение степени деформации ε в продольном сечении отпрессованного прутка в стационарной стадии (а) и график распределения этой величины вдоль радиальной координаты (б)

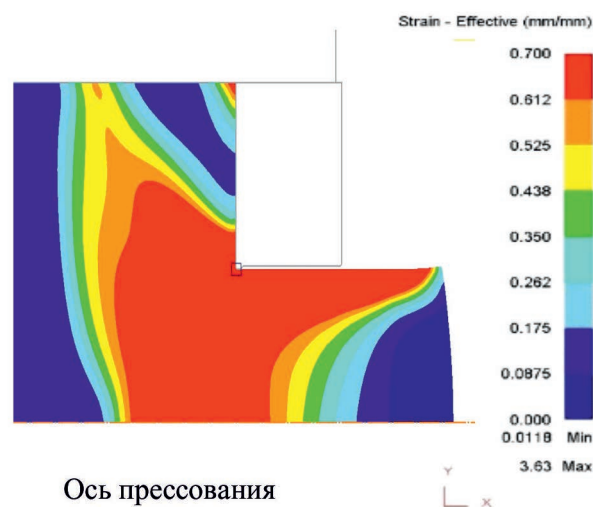
Fig. 3. Distribution of the strain degree ε in the longitudinal section of the pressed rod in the stationary stage (а) and the graph of the distribution of this value along the radial coordinate (б)

Эта часть решения приведена здесь для того, чтобы оценить разницу в свойствах металла в поперечном сечении в случае использования схемы прессования с малыми коэффициентами вытяжек.

На рис. 4 представлено решение задачи в виде областей равного уровня для переходного процесса от начальной нестационарной стадии к стационарной стадии.

Из рисунка видно, что если вдоль длины прутка в стационарной стадии (рис. 3) степень деформации сохранялась постоянной, то для передней части прутка это условие не выполняется. Наименьшие деформации локализованы в центре переднего торца прутка, наибольшие – локализованы ближе к периферии, но и они едва достигают значения 0,7. Можно напомнить, что степень деформации, определенная через площади поперечных сечений, составила 1,62, что в 2,3 раза больше. Для оценки полученной неравномерности построены графики (рис. 5) и введена относительная радиальная координата r/R , где r – текущий радиус прутка; R – радиус внешней поверхности прутка, равный половине диаметра прутка.

Ход графиков показывает, что по мере удаления от торца возрастают значения степени



Ось прессования

Рис. 4. Распределение степени деформации в продольном сечении в нестационарной начальной стадии

Fig. 4. Distribution of the strain degree in the longitudinal section in the nonstationary initial stage

деформации от нулевого уровня до достижения уровня стационарного этапа прессования. Наиболее плотно расположены линии, построенные для центральной части прутка, что говорит о наименьшем градиенте в этой зоне. Ближе к периферии линии расположены более редко, что соответствует по характеру расположения ходу

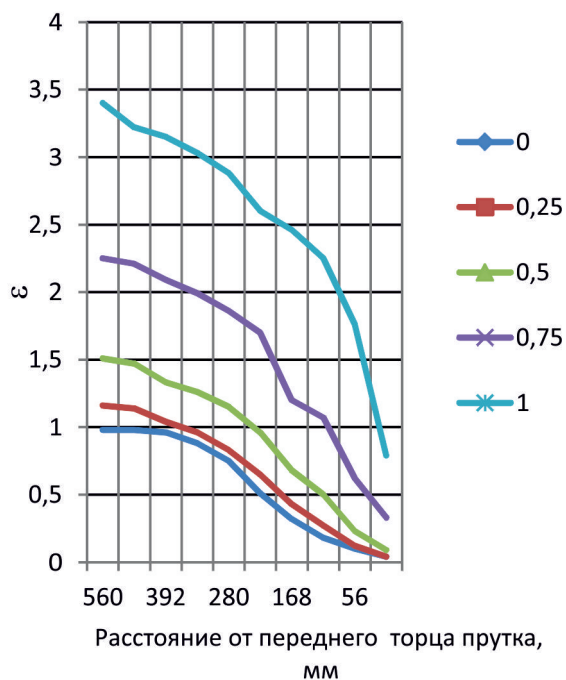


Рис. 5. График распределения степени деформации ε в поперечных сечениях прутка в зависимости от расстояния от переднего торца при различных относительных радиальных координатах r/R

Fig. 5. Graph of the distribution of the strain degree in the cross sections of the rod depending on the distance from the front end at various relative radial coordinates r/R

графика, рис. 3, б, который был получен для стационарного этапа, однако при существенно других номинальных значениях параметра.

Анализ графика, представленного на рис. 5, показывает также, что центральные слои прутка приобретают постоянный уровень степени деформации раньше, чем периферийные слои, т. е. для них стационарность процесса достигается при меньшем перемещении металла.

Полученное распределение деформации распространяется на начальные и граничные условия поставленной задачи. В производстве существует большое разнообразие соотношений параметров. Затраты только машинного времени составили порядка двух недель без учета времени на отладку системы в течение нескольких месяцев. Поэтому перебор всех возможных вариантов производственных технологий и приемов обработки является довольно затратной процедурой. В данном случае выработаны рекомендации для рассмотренного варианта, но сделана попытка распространить их на класс техноло-

гий, связанных с прессованием слитков с малым обжатием.

Рассмотрение полей степени деформации помогает определить накопленную величину характеристики упрочнения. Однако здесь не видно, за счет чего достигается этот эффект. Поэтому на рис. 6 представлено поле скоростей деформации (размерность, с^{-1}).

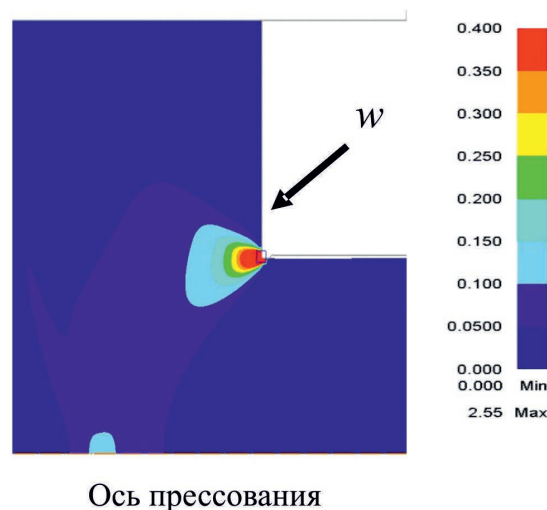


Рис. 6. Распределение скорости деформации ($1/\text{с}$) в продольном сечении (форма очага деформации); W – точка максимума

Fig. 6. Strain rate distribution ($1/\text{sec}$) in the longitudinal section (shape of the deformation zone); W – maximum point

Поскольку степень деформации является интегралом от скорости деформации по траектории перемещения элементарной частицы, то сформировать поле повышенных степеней деформации можно двумя способами: либо за счет высоких скоростей деформации, либо за счет длительного применения умеренных скоростей деформации. На рисунке видно, что вблизи начала калибрующего пояска матрицы образуется зона W очень высоких значений скоростей деформации. Собственно, в этом месте происходит резкое изменение направления перемещения металла и значительно увеличивается сдвиговая компонента тензора деформации.

Можно встать на позицию, что существует минимальная степень деформации, которая нужна для проработки структуры металла. Ранее было показано, что в рассмотренном примере относительное обжатие, рассчитанное по формуле (2), равно 80 %. Для достижения свойств и получения нужной структуры достаточно от-

носительное обжатие только 40 %, что соответствует в соответствии с формулой (3) степени деформации $\varepsilon = 0,51$. Как видно из графика, изображенного на рис. 5, это значение достигается уже при расстоянии от торца отпрессованного прутка 224 мм, что составляет 63 % от диаметра прутка. При этом установившиеся рекомендации предполагают удаление металла на длине до 200 % от диаметра прутка.

Следует отметить, что наличие слабodeформированной области в передней (выходной) части пресс-изделия неоднократно подтверждалось экспериментальными исследованиями, выполненными в основном методом координатных сеток [22, 23]. Однако эти исследования проводились, как правило, на модельном материале, например свинце, а также при гораздо меньших геометрических параметрах.

Применение метода конечных элементов позволило задать для решения реальные размеры заготовок и реальные свойства деформируемого материала.

Практическая ценность представленного исследования заключается в том, что по данным результатам расчета можно оценить степень деформации, полученную прутком в начальной нестационарной стадии прессования и принять решение, возможно ли использовать этот металл для дальнейшей обработки или его следует отправить на переплав.

Одна из проблем, возникающих после окончания процесса прессования, состоит в том, что необходимо произвести оценку механических свойств готового продукта. Это приходится делать, отбирая темплет, который расположен на определенном расстоянии от выходного конца. Это расстояние регламентировано стандартом. Каковы свойства продукта на меньшем или большем расстоянии от указанного места, остается неизвестным. Возможно, что часть отпрессованного прутка обладает необходимым уровнем физико-механических свойств, но их оказывается нечем измерить. Получается, что более простой выход – это направить возможно хороший металл на переплав. Наличие решения задачи методом конечных элементов позволяет построить картину распределения степени деформации и связать это распределение с распределением свойств при наличии заранее известных функциональных зависимостей.

Другим вариантом использования полученного решения является использование передней части отпрессованного прутка для повторного прессования на прессе меньшей мощности с получением изделия меньшего диаметра. В этом случае в первом приближении степени деформации на двух этапах прессования можно сложить, используя принцип аддитивности. При большей степени деформации будут достигнуты более высокие свойства продукта.

Выводы

В процессе прессования с малым коэффициентом вытяжки степень деформации распределяется неравномерно как по поперечному сечению пресс-изделия, так и по его длине. Разница между степенями деформации (логарифмическими) на оси и на периферии отпрессованного прутка может оказаться выше 300 %. В нестационарной начальной стадии прессования передняя часть прутка остается слабо деформированной как на периферии, так и в центре, что часто вынуждает отправлять ее на переплав вследствие недостаточно проработанной структуры металла. В то же время, если установить ограничения на минимально возможную степень деформации, то с помощью результатов расчета методом конечных элементов можно установить минимальную длину удаляемого металла, за счет чего удастся снизить массу отходов, направляемых в переплав.

Список литературы

1. Energy dissipation characteristics modelling for hot extrusion forming of aluminum-alloy components / H. Li, Y. Wu, H. Cao, F. Lu, C. Li // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology*. – 2022. – P. 1–23. – DOI: 10.1007/s40684-021-00410-y.
2. Effect of spinning deformation on microstructure evolution and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu (7075) alloy / F. Zheng, H. Chen, W. Wang, R. Liu, J. Lian // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2022. – DOI: 10.1007/s11665-022-06705-8.
3. Дмитриук А.И., Григорьев А.А. Совершенствование технологии прессования алюминиевых заготовок // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2020. – Т. 18, № 8. – С. 353–358.
4. Li F., Chu G.-n., Liu X.-j. Deformation division of metal flow behavior during extrusion process of 7075 aluminum alloy // *Journal of Central South University*

of Technology. – 2009. – Vol. 16. – P. 738–742. – DOI: 10.1007/s11771-009-0122-3.

5. Li F., Yuan S., He Z. Effect of guiding angle on metal flow and defects in extrusion deformation // *Cailiao Kexue yu Gongyi / Material Science and Technology*. – 2007. – Vol. 15, N 1. – P. 15–18.

6. Бережной В.Л. Анализ и формализация представлений о неравномерности деформации для технологического развития прессования // *Технология легких сплавов*. – 2013. – № 1. – С. 40–57.

7. Plastic deformation analysis of accumulative back extrusion / S.C. Yoon, A.V. Nagasekhar, S.-Y. Kang, H.S. Kim // *International Journal of Materials Research*. – 2009. – Vol. 100 (12). – P. 1715–1719. – DOI: 10.3139/146.110236.

8. Меркулова С.М., Бер Л.Б., Ростова Т.Д. Изменение микроструктуры прутков из сплава 1561 в процессе прессования с увеличенной сдвиговой компонентой // *Технология легких сплавов*. – 2015. – № 3. – С. 85–89.

9. Щербель Р.Д., Меркулова С.М. Исследование возможности формирования равномерных по длине механических свойств крупногабаритных полос из сплава МА2-1 пч при прессовании с малыми вытяжками // *Технология легких сплавов*. – 2012. – № 4. – С. 103–109.

10. Колмогоров В.Л. Напряжения. Деформации. Разрушение. – М.: Металлургия, 1970. – 229 с.

11. Логинов Ю.Н., Антоненко Л.В. Изучение напряженно-деформированного состояния для предупреждения образования продольных трещин в прессованных трубах // *Цветные металлы*. – 2010. – № 5. – С. 119–122.

12. Hawryluk M., Suliga M., Więclaw M. Application of physical modeling with the use of soft model materials for the analysis and optimization of metal extrusion processes // *Physical Mesomechanics*. – 2022. – Vol. 25. – P. 57–71. – DOI: 10.1134/s1029959922010076.

13. Koloskov S., Sidelnikov S., Voroshilov D. Modeling process of semi-continuous extrusion of hollow 6063 aluminum alloy profiles using QForm extrusion // *Solid State Phenomena*. – 2021. – Vol. 316. – P. 288–294.

14. Ershov A.A., Kotov V.V., Loginov Yu.N. Capabilities of QForm-extrusion based on an example of the extrusion of complex shapes // *Metallurgist*. – 2012. – Vol. 55 (9–10). – P. 695–701. – DOI: 10.1007/s11015-012-9489-8.

15. Numerical modeling of the extrusion process of aluminum alloy 6xxx series section / A. Kawalek, T. Bajor, M. Kwapisz, S. Sawicki, J. Borowski // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. – 2021. – Vol. 56, iss. 2. – P. 375–381.

16. The development of grain structure during axisymmetric extrusion of AA3003 aluminum alloys / Y. Mahmoodkhani, M.A. Wells, W.J. Poole, L. Grajales, N. Parson // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2015. – Vol. 46, iss. 12. – P. 5920–5932. – DOI: 10.1007/s11661-015-3168-x.

17. Numerical simulation and die structure optimization of an aluminum rectangular hollow pipe extrusion process / X. Wu, G. Zhao, Y. Luan, X. Ma // *Materials Science and Engineering: A*. – 2006. – Vol. 435–436. – P. 266–274. – DOI: 10.1016/j.msea.2006.06.114.

18. Simulation study on equal channel right angular extrusion process of aluminum alloy 6061 / W. Jiang, L. Wen, H. Yang, M. Hu, P.K.-L. Song // *Light Metals 2020*. – Cham: Springer, 2020. – P. 433–439. – (Minerals, Metals and Materials Series). – DOI: 10.1007/978-3-030-36408-3_61.

19. Логинов Ю.Н., Полищук Е.Г., Тугбаев Ю.В. Особенности моделирования процесса прессования труб из сплавов на основе циркония // *Цветные металлы*. – 2018. – № 9. – С. 82–87. – DOI: 10.17580/tsm.2018.09.13.

20. Каргин В.Р., Дерябин А.Ю. О конечно-элементном анализе напряженно-деформированного состояния при прессовании крупногабаритных прутков с малыми вытяжками // *Технология легких сплавов*. – 2016. – № 3. – С. 62–68.

21. Каргин В.Р., Дерябин А.Ю. Моделирование температурного поля при прессовании крупногабаритных прутков из труднодеформируемого алюминиевого сплава ENAW2014 с использованием программы Deform-2D // *Технология легких сплавов*. – 2016. – № 4. – С. 61–67.

22. Баузер М., Завер Г., Зигерт К. Прессование: пер. с нем. – М.: Алюсил МВнТ, 2009. – 922 с.

23. Перлин И.Л., Райтбарг Л.Х. Теория прессования металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 447 с.

24. Dynamic mechanical behavior of 6061 al alloy at elevated temperatures and different strain rates / X. Fan, T. Suo, Q. Sun, T. Wang // *Acta Mechanica Sinica*. – 2013. – Vol. 26, N 2. – P. 111–120. – DOI: 10.1016/S0894-9166(13)60011-7.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

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



Deformations in the nonstationary stage of aluminum alloy rod extrusion process with a low elongation ratio

Yuri Loginov^{1, 2, a, *}, Georgy Shimov^{1, b}, Natalia Bushueva^{1, c}

¹ Ural Federal University, 19 Mira st., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation

² M.N. Miheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of RAS, 18 S. Kovalevskaya st., Ekaterinburg, 620137, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-7222-2521>, j.n.loginov@urfu.ru, ^b <http://orcid.org/0000-0001-5763-0837>, g.v.shimov@urfu.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0002-0603-8785>, m0rgondagen@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 21 apr 2022

Revised: 21 April 2022

Accepted: 29 April 2022

Available online: 15 June 2022

Keywords:

Extrusion process

Metal forming

Aluminum alloy

Finite element method

Plastic deformation

Funding

The study was financially supported by the Russian Science Foundation, agreement 22-29-00931 dated December 20, 2021.

Acknowledgements

Research were partially conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials"

ABSTRACT

Introduction. It is noted that extrusion is the main procurement process in the aluminum alloys forming operations. At the same time, the process has such a disadvantage as the nonstationarity of the metal plastic flow. **The work aim** is to establish the inhomogeneity deformation level of the pressed rod front part by numerical simulation using the finite element method. The study objectives are to formulate the extrusion process boundary conditions, to obtain a solution and to evaluate the inhomogeneity degree. **Research methods:** the finite element method was used to evaluate the deformed state. The actions sequence included the creation of primary deformation zone shape and the tool configuration. The mutual movement of the tool and the deformable material is set using the appropriate boundary conditions. The deformable medium is a ductile material with power-law hardening, the physical and mechanical properties correspond to the aluminum alloy of the 6000 series. **Results and discussion:** It is revealed that the strain degree in the pressed rod front part is extremely nonuniform distributed; differences above 300% are recorded. The strain degree distribution dependences in the rod cross sections are constructed depending on the distance from the front end at different relative radial coordinates. It is revealed that the rod central layers acquire a constant level of the strain degree earlier than the peripheral layers. The stationary process is achieved with less metal motion. **The work result application scope** is the technological study of rational metal cutting of aluminum alloys at the extrusion final stage in order to use recyclable waste more rationally. **Conclusions.** In the extrusion process with a low elongation ratio, the strain degree is distributed nonuniform both along the press rod cross and along its length. The rod front part remains weakly deformed both at the periphery and in the center in the nonstationary initial extrusion stage. It often forces to send for remelting due to the insufficiently developed metal structure. At the same time, if the limits on the minimum possible degree of deformation are set, then using the results of the calculation by the finite element method, the minimum length of the metal to be removed can be set, thereby reducing the mass of waste sent for remelting.

For citation: 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, vol. 24, no. 2, pp. 39–49. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-39-49. (In Russian).

References

1. Li H., Wu Y., Cao H., Lu F., Li C. Energy dissipation characteristics modelling for hot extrusion forming of aluminum-alloy components. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology*, 2022, pp. 1–23. DOI: 10.1007/s40684-021-00410-y.

* Corresponding author

Loginov Yuri N., Ph.D. (Engineering), Full Professor
 Ural Federal University,
 19 Mira st.,
 620002, Ekaterinburg, Russian Federation
 Tel.: 8 (343) 375-44-37, e-mail: j.n.loginov@urfu.ru

2. Zheng F., Chen H., Wang W., Liu R., Lian J. Effect of spinning deformation on microstructure evolution and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu (7075) alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022. DOI: 10.1007/s11665-022-06705-8.
3. Dmitryuk A.I., Grigor'ev A.A. Sovershenstvovanie tekhnologii pressovaniya alyuminiyevykh zagotovok [Enhancement of aluminum billets extrusion technology]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii = Blanking productions in mechanical engineering*, 2020, vol. 18, no. 8, pp. 353–358.
4. Li F., Chu G.-n., Liu X.-j. Deformation division of metal flow behavior during extrusion process of 7075 aluminum alloy. *Journal of Central South University of Technology*, 2009, vol. 16, pp. 738–742. DOI: 10.1007/s11771-009-0122-3.
5. Li F., Yuan S., He Z. Effect of guiding angle on metal flow and defects in extrusion deformation. *Cailiao Kexue yu Gongyi / Material Science and Technology*, 2007, vol. 15, no. 1, pp. 15–18.
6. Berezhnoy V.L. Analiz i formalizatsiya predstavlenii o neravnomernosti deformatsii dlya tekhnologicheskogo razvitiya pressovaniya [Analysis and formalization of insights about nonuniformity of strain for technological development of extrusion]. *Tekhnologiya legkikh splavov = Technology of light alloys*, 2013, no. 1, pp. 40–57.
7. Yoon S.C., Nagasekhar A.V., Kang S.-Y., Kim H.S. Plastic deformation analysis of accumulative back extrusion. *International Journal of Materials Research*, 2009, vol. 100 (12), pp. 1715–1719. DOI: 10.3139/146.110236.
8. Merkulova S.M., Ber L.B., Rostova T.D. Izmenenie mikrostruktury prutkov iz splava 1561 v protsesse pressovaniya s uvelichennoi sdvigovoi komponentoi [Alteration in 1561 alloy bar microstructure during extrusion process carried out with an increased shear component]. *Tekhnologiya legkikh splavov = Technology of light alloys*, 2015, no. 3, pp. 85–89.
9. Shcherbel R.D., Merkulova S.M. Issledovanie vozmozhnosti formirovaniya ravnomernykh po dline mekhanicheskikh svoystv krupnogabaritnykh polos iz splava MA2-1 pch pri pressovanii s malymi vytyazhkami [Investigation of the possibility of formation of uniform mechanical properties through length in large_size MA2-1pch alloy strips in the case of extrusion with Low reductions]. *Tekhnologiya legkikh splavov = Technology of light alloys*, 2012, no. 4, pp. 103–109.
10. Kolmogorov V.L. *Napryazheniya. Deformatsii. Razrushenie* [Stress, Deformation. Fracture]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 229 p.
11. Loginov Yu.N., Antonenko L.V. Izuchenie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya dlya preduprezhdeniya obrazovaniya prodol'nykh treshchin v pressovannykh trubakh [Research of the strain-stress state for the prevention of longitudinal splits formation in the extruded pipes]. *Tsvetnye metally*, 2010, no. 5, pp. 119–122. (In Russian).
12. Hawryluk M., Suliga M., Więclaw M. Application of physical modeling with the use of soft model materials for the analysis and optimization of metal extrusion processes. *Physical Mesomechanics*, 2022, vol. 25, pp. 57–71. DOI: 10.1134/s1029959922010076.
13. Koloskov S., Sidelnikov S., Voroshilov D. Modeling process of semi-continuous extrusion of hollow 6063 aluminum alloy profiles using QForm extrusion. *Solid State Phenomena*, 2021, vol. 316, pp. 288–294. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.316.288.
14. Ershov A.A., Kotov V.V., Loginov Yu.N. Capabilities of QForm-extrusion based on an example of the extrusion of complex shapes, *Metallurgist*, 2012, vol. 55 (9–10), pp. 695–701. DOI: 10.1007/s11015-012-9489-8.
15. Kawałek A., Bajor T., Kwapisz M., Sawicki S., Borowski J. Numerical modeling of the extrusion process of aluminum alloy 6xxx series section. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 2021, vol. 56, iss. 2, pp. 375–381.
16. Mahmoodkhani Y., Wells M.A., Poole W.J., Grajales L., Parson N. The development of grain structure during axisymmetric extrusion of AA3003 aluminum alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2015, vol. 46, iss. 12, pp. 5920–5932. DOI: 10.1007/s11661-015-3168-x.
17. Wu X., Zhao G., Luan Y., Ma X. Numerical simulation and die structure optimization of an aluminum rectangular hollow pipe extrusion process. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, vol. 435–436, pp. 266–274. DOI: 10.1016/j.msea.2006.06.114.
18. Jiang W., Wen L., Yang H., Hu M., Song P.K.-L. Simulation study on equal channel right angular extrusion process of aluminum alloy 6061. *Light Metals 2020. The Minerals, Metals and Materials Series*. Cham: Springer, 2020, pp. 433–439. DOI: 10.1007/978-3-030-36408-3_61.
19. Loginov Yu.N., Polishchuk E.G., Tugbaev Yu.V. Osobennosti modelirovaniya protsessa pressovaniya trub iz splavov na osnove tsirkoniya [Features of the zirconium-based alloys tube pressing process modeling]. *Tsvetnye Metally*, 2018, no. 9, pp. 82–87. DOI: 10.17580/tsm.2018.09.13. (In Russian).

20. Kargin V.R., Deryabin A.Yu. O konechno-elementnom analize napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya pri pressovanii krupnogabaritnykh prutkov s malymi vytyazhkami [On a finite element analysis of the stress-strain state in the case of large-size bar extruding with low extrusion ratios]. *Tekhnologiya legkikh splavov = Technology of light alloys*, 2016, no. 3, pp. 62–68.

21. Kargin V.R., Deryabin A.Yu. Modelirovanie temperaturnogo polya pri pressovanii krupnogabaritnykh prutkov iz trudnodeformiruemogo alyuminievogo splava ENAW2014 s ispol'zovaniem programmy Deform-2D [Simulation of a temperature field with the use of Deform-2D software for extrusion of large-size difficult-to-Deform ENAW2014 aluminium alloy bars]. *Tekhnologiya legkikh splavov = Technology of light alloys*, 2016, no. 4, pp. 61–67.

22. Bauser M., Sauer G., Siegert K., eds. *Extrusion*. ASM International, 2006. 592 p. (Russ. ed.: Bauzer M., Zauer G., Zigert K. *Pressovanie*. Moscow, Alyusil MViT Publ., 2009. 922 p.).

23. Perlin I.L., Raitbarg L.Kh. *Teoriya pressovaniya metallov* [Theory of metal extrusion]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975. 447 p.

24. Fan X., Suo T., Sun Q., Wang T. Dynamic mechanical behavior of 6061 al alloy at elevated temperatures and different strain rates. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2013, vol. 26, no. 2, pp. 111–120. DOI: 10.1016/S0894-9166(13)60011-7.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2022 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/>).