

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОЙ СТАДИИ ПРЯМОГО ПРЕССОВАНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПРУТКОВ ПРИ МАЛЫХ ВЫТЯЖКАХ

© 2018 г. В.Р. Каргин, А.Ю. Дерябин

Самарский национальный исследовательский университет (СНИУ) им. акад. С.П. Королева

АО «Арконики СМЗ», г. Самара

Статья поступила в редакцию 13.12.17 г., доработана 22.02.18 г., подписана в печать 26.02.18 г.

Проведено моделирование процесса прямого прессования крупногабаритных прутков с диаметрами 188, 214, 252, 283, 326, 560 мм из алюминиевого сплава 7075 при коэффициентах трения 0 и 0,5, углах конуса матрицы 80° и 90° из контейнера диаметром 800 мм на прессе 200 МН в программном пакете DEFORM-2D. Получено распределение радиальных скоростей течения металла на рабочей поверхности пресс-шайбы в зависимости от величины контактного трения, угла конуса матрицы и коэффициента вытяжки на основной и заключительной стадиях прессования. Высоту пресс-остатка в момент начала образования центральной пресс-утяжины принимали равной расстоянию между плоскостью пресс-шайбы и плоскостью входа прессуемого металла в рабочий канал плоской или конической матриц. Изучено совместное влияние коэффициента вытяжки, коэффициента трения и угла конуса матрицы на высоту пресс-остатка, усилие прессования, интенсивности скоростей деформаций и напряжений, температуру на кромке канала матрицы. Численные эксперименты проведены по плану полного факторного эксперимента 2^3 для интервалов варьирования параметров: $X_1 = 3 \div 9$, $X_2 = 0 \div 0,5$, $X_3 = 80 \div 90$ град. Трение между инструментом и заготовкой на заключительной стадии прессования играет отрицательную роль, заметно снижая радиальную скорость. Это приводит к более раннему началу образования центральной пресс-утяжины. Прессование в коническую матрицу и увеличение коэффициента вытяжки, наоборот, повышают радиальную скорость течения и обеспечивают более позднее начало образования центральной пресс-утяжины. Основным фактором, определяющим высоту пресс-остатка, является коэффициент вытяжки. Предложена математическая модель для выбора толщины пресс-остатка при конкретных условиях прессования крупногабаритных круглых прутков с малыми вытяжками.

Ключевые слова: прессование, крупногабаритные прутки, труднодеформируемый алюминиевый сплав 7075, пресс-утяжина, пресс-остаток, моделирование, матрица планирования эксперимента, программа DEFORM.

Каргин В.Р. — докт. техн. наук, проф. кафедры обработки металлов давлением (ОМД), СНИУ им. акад. С.П. Королева (443086, г. Самара, Московское ш., 34). E-mail: vrkargin@mail.ru.

Дерябин А.Ю. — аспирант кафедры ОМД, СНИУ им. акад. С.П. Королева, вед. инженер-технолог АО «Аркины СМЗ» (443051, г. Самара, ул. Алма-Атинская, 29, к. 33/34). E-mail: andrey77d@mail.ru.

Для цитирования: Каргин В.Р., Дерябин А.Ю. Моделирование заключительной стадии прямого прессования крупногабаритных прутков при малых вытяжках // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2018. No. 5. С. 48–55.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2018-5-48-55.

Kargin V.R., Deryabin A.Yu.

Simulation of final direct extrusion stage for large rods with low extrusion ratio

The direct extrusion of large 7075 alloy bars 188, 214, 252, 283, 326, 560 mm in diameter was simulated with 0 and 0,5 friction coefficients, 80° and 90° die cone angles from the 800 mm diameter container at the 200 MN press using the DEFORM-2D software package. It provided the distribution of metal flow radial velocities on the dummy block working surface versus the contact friction value, die cone angle and extrusion ratio factor at the main and final stages of extrusion. Butt-end height at the beginning of back-end extrusion defect formation was taken equal to a distance between the dummy block plane and the plane of extruded metal feeding into flat or cone die openings. The joint effect of the extrusion ratio factor, friction coefficient and die cone angle on the butt-end height, extrusion force, deformation and stress intensity factors, and die opening edge temperature was studied. Numerical experiments were performed based on the 2^3 complete factorial design for the following parameter variability intervals: $X_1 = 3 \div 9$, $X_2 = 0 \div 0,5$, $X_3 = 80 \div 90^\circ$. Friction between the tool and the blank at the final extrusion stage has a negative effect due to a noticeable radial velocity reduction. This leads to the earlier initiation of central back-end extrusion defect formation. Extrusion into the conical die and increasing the extrusion ratio factor, on the contrary, speeds up radial flow velocity and ensures that the back-end extrusion defect starts forming later. The main factor that determines butt-end height is the extrusion ratio factor. A mathematical model is proposed to select the butt-end thickness for specific conditions of extruding large bars with low extrusion ratios.

Keywords: extrusion, large bars, difficult-to-form 7075 aluminum alloy, back-end extrusion defect, butt-end, simulation, experimental design matrix, DEFORM software.

Kargin V.R. — Dr. Sci. (Tech.), prof. of the Department of metal forming, Samara National Research University (SNRU) n.a. S.P. Korolev (443086, Russia, Samara, Moskovskoe shosse, 34). E-mail: vrkargin@mail.ru.

Deryabin A.Yu. — postgraduate student, Department of metal forming, SNRU n.a. S.P. Korolev, leading engineer-technologist of JSC «Arconic SMZ» (443051, Russia, Samara, Alma-Atinskaya str., 29, k. 33/34). E-mail: andrey77d@mail.ru.

Citation: Kargin V.R., Deryabin A.Yu. Modelirovanie zaklyuchitel'noi stadii pryamogo pressovaniya krupnogabaritnykh prutkov pri malykh vytyazhkakh. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2018. No. 5. P. 48–55.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2018-5-48-55.

Введение

В последние годы появилась потребность в крупногабаритных круглых прутках из дорогостоящих труднодеформируемых алюминиевых сплавов, используемых для изготовления ответственных деталей машиностроения. Такие заготовки можно получать прессованием при малых вытяжках [1, 2].

Заключительная стадия прессования крупногабаритных круглых прутков очень важна, поскольку на этом этапе возникает центральная пресс-утяжина, определяющая размеры пресс-остатка и выход годного [3–8].

Основным источником начала образования центральной пресс-утяжины на заключительной стадии прессования является увеличение радиальной скорости течения металла от периферийных слоев к центральным. Особенно это наблюдается в случае прессования с малыми коэффициентами вытяжки, когда характер радиального потока металла становится преобладающим (рис. 1) [5].

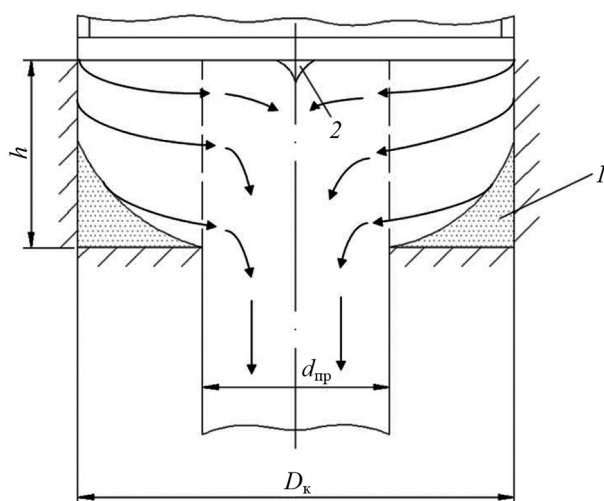


Рис. 1. Схема преобладающего радиального потока прессуемого металла в канал матрицы на завершающей стадии процесса

1 — мертвая зона

2 — начало образования центральной пресс-утяжины

D_k — диаметр контейнера, $d_{пр}$ — диаметр отпрессованного прутка

На момент зарождения центральной пресс-утяжины влияют множество факторов: коэффициент вытяжки λ , метод прессования, силы трения на поверхностях контейнера, матрицы и пресс-шайбы, природа прессуемого металла, температурное поле заготовки и инструмента, конструкция матриц и пресс-шайб и др. [3–15]. Чем меньше угол наклона образующей конусной матрицы и больше коэффициент вытяжки λ , тем позднее начинается образование центральной пресс-утяжины [3]. Менее нагретая пресс-шайба способствует снижению толщины пресс-остатка [10]. Прессование с рубашкой затрудняет течение металла по рабочей поверхности пресс-шайбы. Это обуславливает более позднее начало формирования пресс-утяжины [13]. При обратном методе высота пресс-остатка меньше, чем при прямом методе [9].

В настоящее время высоту пресс-остатка для различных условий прессования назначают по эмпирической формуле

$$h = KD_k, \quad (1)$$

где D_k — диаметр контейнера, K — эмпирический коэффициент, равный 0,22–0,25 при прямом и 0,12–0,15 при обратном прессовании [14].

Для повышения выхода годного в патентной литературе предложены различные конструкции пресс-шайб, содержащие центральные углубления конической формы, заполняемые металлом заготовки на начальной стадии процесса [16–18]. На заключительном этапе зарезервированный объем металла создает условия для значительного уменьшения вероятности образования пресс-утяжины и высоты пресс-остатка. Известны способ прямого прессования металлов и устройство для его осуществления [19], позволяющие остановить процесс в момент зарождения центральной пресс-утяжины.

Проведенный анализ образования центральной пресс-утяжины на заключительной стадии прессования показал, что в научно-технической

литературе рассмотрено влияние различных факторов на формирование высоты пресс-остатка, но только на качественном уровне. Основным фактором, определяющим выбор размеров пресс-остатка, пока остается диаметр контейнера. Момент возникновения центральной пресс-утяжины изучен мало.

В настоящее время для исследования процессов прессования наиболее широко используется компьютерное моделирование [20—22].

Цель данной работы — провести анализ различных факторов, влияющих на образование центральной пресс-утяжины, и обосновать выбор размера пресс-остатка для конкретных условий прессования крупногабаритных круглых прутков с малыми вытяжками.

Постановка задачи

При выборе размеров пресс-остатка важно знать особенности деформации металла при переходе основной стадии процесса в заключительную, когда происходит выпрессовывание объема очага пластической деформации.

Численное моделирование основной и заключительной стадий прямого прессования реализовано средствами специализированного пакета программ DEFORM-2D на базе метода конечных элементов [23].

Числовые расчеты виртуального прямого прессования на прессе усилием 200 МН крупногабаритных прутков с диаметрами, мм: 188 ($\lambda = 18$), 214 ($\lambda = 14$), 265 ($\lambda = 9$), 283 ($\lambda = 8$), 326 ($\lambda = 6$), 560 ($\lambda = 2$) из труднодеформируемого алюминиевого сплава 7075 [24] проведены при следующих параметрах: диаметр контейнера — $D_k = 800$ мм; размеры заготовки — $D \times L = 785 \times 1000$ мм; температура нагрева заготовки — 450 °С; температура матрицы, контейнера и пресс-шайбы — соответственно 450, 400 и 350 °С; скорость прессования — 2,2 мм/с; количество конечных элементов в заготовке, пресс-шайбе и матрице с контейнером — соответственно 4000, 2000 и 5000; коэффициент трения на контактных поверхностях инструмента принят по закону Зибеля; коэффициент теплопередачи — 11 кВт/(м²·град); материал инструмента — ANSI-H-13.

При постановке задачи компьютерного моделирования ее рассматривали как осесимметричную. Толщину слоя металла, находящегося в контейнере пресса, на основной стадии процесса задавали

равной половине диаметра контейнера, что перекрывает высоту очага деформации, а на заключительной стадии — соответствующей моменту начала образования центральной пресс-утяжины. Высоту пресс-остатка принимали равной расстоянию между плоскостью пресс-шайбы и плоскостью входа прессуемого металла в рабочий канал плоской или конической матриц в момент возникновения центральной пресс-утяжины.

При значительном приближении пресс-шайбы к матрице изменяются скорости течения металла, особенно в поперечном направлении. В связи с этим для рассмотрения полной картины деформации проведен анализ распределения радиальных скоростей течения металла на рабочей поверхности пресс-шайбы в зависимости от величины трения, угла конуса матрицы и коэффициента вытяжки на основной и заключительной стадиях прессования.

Анализ полученных результатов

На рис. 2 приведены графики распределения радиальной скорости течения металла (V_R) на основной стадии процесса и в момент начала образования центральной пресс-утяжины при коэффициентах вытяжки $\lambda = 3$ и 6, коэффициентах трения $\mu = 0$ и 0,5, углах конуса матрицы $\alpha = 80$ и 90°.

В табл. 1 представлены значения высоты пресс-остатка в момент образования пресс-утяжины для конкретных условий прессования.

Распределение радиальной компоненты скорости течения металла на рабочей поверхности пресс-шайбы в основной и заключительной стадиях процесса неравномерное (см. рис. 2). Величина V_R минимальна у стенок контейнера и на оси прессования, а от периферии к центру увеличивается, достигая экстремальных значений в области над кромкой калибрующего пояса. При приближении к оси прессования значения V_R уменьшаются.

Таблица 1
Зависимость высоты пресс-остатка (h) от коэффициента вытяжки (λ), коэффициента трения (μ) и угла конуса матрицы (α)

λ	μ	α , град	h , мм
6	0	90	103,0
6	0,5	90	109,4
6	0	80	98,7
3	0	90	170,9

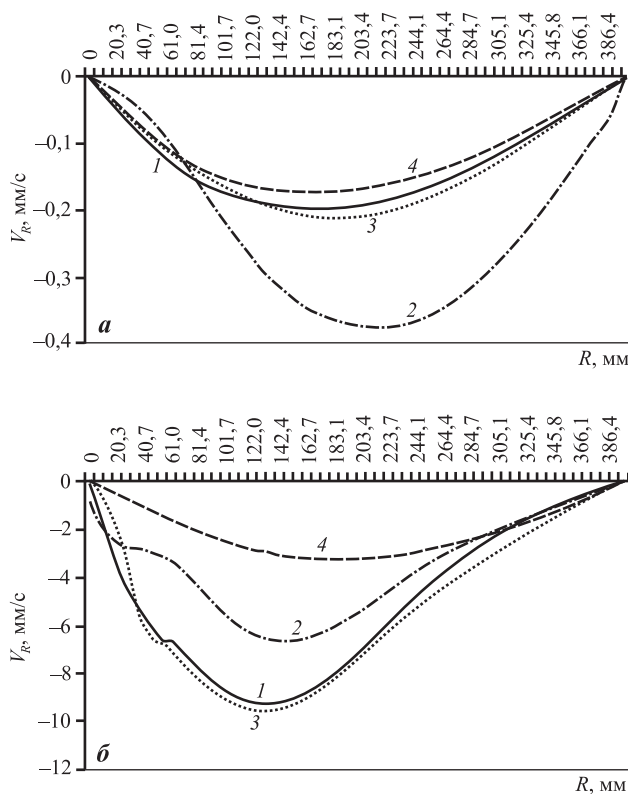


Рис. 2. Распределение радиальной скорости течения металла на основной стадии процесса (**a**) и в момент начала образования центральной пресс-утяжины (**б**)
 1 – $\lambda = 6$, $\mu = 0$, $\alpha = 90^\circ$; 2 – $\lambda = 6$, $\mu = 0,5$, $\alpha = 90^\circ$;
 3 – $\lambda = 6$, $\mu = 0$, $\alpha = 80^\circ$; 4 – $\lambda = 3$, $\mu = 0$, $\alpha = 90^\circ$

В момент начала формирования центральной пресс-утяжины отмечаются резкое повышение радиальной скорости течения и смещение максимальных значений V_R ближе к оси прессования.

Из сравнения результатов прессования при отсутствии контактного трения на инструменте и его наличии (кр. 1 и 2 на рис. 2) видно, что при прессовании с трением наблюдается рост экстремальных значений V_R на основной стадии процесса на 87 %, а на заключительной стадии — их снижение на 30 %.

Таким образом, трение на заключительной стадии прессования играет отрицательную роль, заметно уменьшая радиальную скорость течения в поперечном направлении от контейнера к каналу матрицы. Это приводит к более раннему началу образования центральной пресс-утяжины. Рост высоты пресс-остатка при $\mu = 0,5$ по сравнению с $\mu = 0$ составил 6,2 % (см. табл. 1).

Из сравнения результатов прессования в плоскую и коническую матрицы (кр. 1 и 3 на рис. 2)

видно, что во втором случае максимальная радиальная компонента скорости на основной стадии процесса выросла на 10 %, а на заключительной — на 16 %, по сравнению с экстремальной величиной V_R в варианте с плоской матрицей.

Таким образом, прессование в коническую матрицу играет положительную роль, повышая радиальную скорость течения металла в поперечном направлении. Это приводит к более позднему появлению центральной пресс-утяжины, а уменьшение высоты пресс-остатка составило 4 % по сравнению с прессованием в плоскую матрицу.

Было установлено (кр. 1 и 4 на рис. 2), что при уменьшении коэффициента вытяжки λ скорость V_R снижается по абсолютной величине — на основной стадии на 15 %, а на заключительной на 64 %. Это свидетельствует о том, что объема металла, находящегося над матрицей, при $\lambda = 3$ становится недостаточно для питания объема металла, расположенного над каналом матрицы.

Таким образом, пониженные коэффициенты вытяжки при прессовании изделий играют отрицательную роль. Это приводит к более раннему началу образования центральной пресс-утяжины и росту отходов. Увеличение высоты пресс-остатка при прессовании в случае $\lambda = 3$, по сравнению с $\lambda = 6$, составило 66 %.

Построение математической модели

Представляет известный интерес изучение совместного влияния коэффициента вытяжки (X_1), коэффициента трения (X_2) и угла конуса матрицы (X_3) на высоту пресс-остатка h , усилие прессования P , интенсивность напряжений σ_i , интенсивность скоростей деформации H_i и температуру t на кромке калибрующего канала матрицы в момент начала образования центральной пресс-утяжины. Численные эксперименты проведены по плану полного факторного эксперимента 2^3 [25] для интервалов варьирования параметров $X_1 = 3 \div 9$, $X_2 = 0 \div 0,5$, $X_3 = 80 \div 90$ град (табл. 2).

Результатам численных экспериментов, выполненных по плану такой матрицы, будет отвечать следующий алгебраический полином второй степени:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3,$$

где b_0 , b_1 , b_2 , b_3 , b_{12} , b_{13} , b_{23} , b_{123} — расчетные ко-

Таблица 2

Матрица планирования полного факторного эксперимента 2^3

Номер опыта	Факторы в натуральном масштабе			Выходные параметры				
	λ	μ	α	h , мм	P , МН	σ_i , МПа	H_i , с ⁻¹	t , °С
	X_1	X_2	X_3					
1	3	0	80	174	60,4	76,1	0,11	438,8
2	9	0	80	82,4	79,3	77,6	0,33	491,4
3	3	0,5	80	170,4	71,3	74,9	0,10	441,6
4	9	0,5	80	88,4	111,4	65,6	0,23	502,0
5	3	0	90	170,9	62,1	74,0	0,09	417,9
6	9	0	90	80	80,1	77,7	0,31	496,1
7	3	0,5	90	174	69,9	77,6	0,09	491,4
8	9	0,5	90	90,2	109,2	65,6	0,21	501,6

эффиценты; x_1, x_2, x_3 — кодированные значения факторов:

$$x_1 = \frac{X_1 - 6}{3}, \quad x_2 = \frac{X_2 - 0,25}{0,25}, \quad x_3 = \frac{X_3 - 85}{5}.$$

В результате обработки численных экспериментальных данных получены математические модели, в которых исключены расчетные коэффициенты, величина которых составляет <1 % относительно исходного значения коэффициента b_0 , определяющего центр эксперимента:

$$h = 128,8 - 43,54X_1 + 1,96X_2 + 2,09X_1X_2 + 1,36X_2X_3,$$

$$P = 80,46 + 14,54X_1 + 9,99X_2 + 5,31X_1X_2,$$

$$H_i = 0,184 + 0,086X_1 - 0,026X_2 - 0,009X_3 - 0,024X_1X_2,$$

$$\sigma_i = 73,6 - 2,0X_1 - 2,7X_2 - 3,3X_1X_2,$$

$$t = 472,6 + 25,2X_1 + 11,6X_2 + 4,1X_3 - 7,5X_1X_2 + 8,2X_2X_3 - 9,5X_1X_2X_3.$$

Первая модель подтверждает полученные ранее результаты и показывает, что в рассматриваемой области исследования на высоту пресс-остатка h в значительной степени оказывает влияние коэффициент вытяжки (X_1) и в меньшей степени — коэффициент трения (X_2), а также совместно коэффициент вытяжки и коэффициент трения (X_1X_2), коэффициент трения и угол конуса матрицы (X_2X_3). Главным фактором, определяющим высоту пресс-остатка, является коэффициент вытяжки.

Из второй модели следует, что на усилие прессования P основное влияние оказывает, прежде всего, коэффициент вытяжки (X_1), а затем уже коэффициент трения (X_2), а также совместно эти факторы (X_1X_2).

Третья модель показывает, что на интенсивность скоростей деформаций H_i в большей степени оказывает влияние коэффициент вытяжки (X_1) и в меньшей — коэффициент трения (X_2).

Из анализа четвертой модели видно, что интенсивность напряжений σ_i в значительной степени зависит от совместного влияния коэффициента вытяжки и коэффициента трения (X_1X_2) и в меньшей степени — коэффициента трения (X_2).

Пятая модель свидетельствует, что в рассматриваемой области исследования на температуру t большее влияние оказывает коэффициент вытяжки (X_1) и меньшее — коэффициент трения (X_2).

При моделировании в программе DEFORM проведен также расширенный расчет величин пресс-остатков в момент начала образования пресс-утяжин для прессования прутков с различными коэффициентами вытяжки (2, 6, 8, 9, 14 и 18) в условиях реального производства. По результатам полученных высот пресс-остатков (на рис. 3 показаны в виде значков) с помощью метода наименьших квадратов построена аппроксимирующая кривая:

$$h/D_k = 0,302 - 0,03\lambda + 0,001\lambda^2. \quad (2)$$

Из анализа полученной формулы (2) видно, что при уменьшении коэффициента вытяжки высота пресс-остатка резко возрастает по экспоненте,

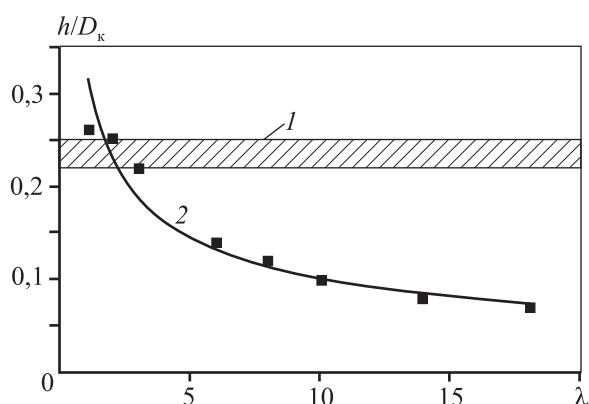


Рис. 3. Графики изменения относительной высоты пресс-остатка (h/D_k) в зависимости от коэффициента вытяжки (λ)
1 – расчет по формуле (1); 2 – расчет по формуле (2)

поэтому при прессовании с малыми вытяжками целесообразно осуществлять выбор размеров пресс-остатка с учетом заданного значения λ . Это позволит (в отличие от традиционного расчета h по формуле (1)) повысить выход годного.

Выводы

1. Проведен анализ влияния трения, угла конуса матрицы и коэффициента вытяжки на процесс образования центральной пресс-утяжины на заключительной стадии прессования.

2. Трение играет отрицательную роль, заметно снижая радиальную скорость течения металла в поперечном направлении от контейнера к каналу матрицы. Это приводит к более раннему началу образования центральной пресс-утяжины. Рост высоты пресс-остатка при $\mu = 0,5$, по сравнению с $\mu = 0$, составил 6,2 %.

3. Прессование в коническую матрицу оказывает положительное влияние на процесс, повышая радиальную скорость в поперечном направлении. Это способствует более позднему началу появления центральной пресс-утяжины. Уменьшение высоты пресс-остатка при прессовании в коническую матрицу, по сравнению с плоской матрицей, составило 4 %.

4. Повышение коэффициента вытяжки играет положительную роль, так как увеличивает объем металла, расположенный между пресс-шайбой и матрицей. Это обуславливает рост радиальной скорости течения металла в зону канала матрицы и более позднее начало формирования центральной пресс-утяжины. Уменьшение высоты пресс-

остатка при прессовании с $\lambda = 6$, по сравнению с $\lambda = 3$, составило 66 %.

5. Получены математические модели, связывающие высоту пресс-остатка, усилие прессования, интенсивности напряжений и скоростей деформаций и температуру на кромке канала матрицы с трением, углом конуса матрицы и коэффициентом вытяжки.

6. Среди рассмотренных факторов главное влияние на формирование центральной пресс-утяжины в момент ее образования оказывает коэффициент вытяжки и, в меньшей степени, коэффициент трения, а также, совместно, коэффициент трения и вытяжка, коэффициент трения и угол конуса матрицы.

7. Предложена математическая модель для выбора толщины пресс-остатка для конкретных условий прессования крупногабаритных круглых прутков из алюминиевого сплава 7075 с малыми вытяжками.

Литература

1. Лукашенко В.Н. Обоснование целесообразности прессования с коэффициентом вытяжки $\lambda < 10$ // Технол. легких сплавов. 1980. No. 5. С. 11–14.
2. Kargin V.R., Deryabin A.Y. Characteristics of large bars extruding using small extrusion ratio // Key Eng. Mater. 2016. Vol. 644. P. 211–217.
3. Перлин И.Л., Райтбарг Л.Х. Теория прессования металлов. М.: Металлургия, 1975.
4. Bauser M., Sauer G., Siebert K. Extrusion. USA: ASM International, 2006. 2nd ed.
5. Pradip K. Saha. Aluminum extrusion technology. USA: ASM International. 2000.
6. Wojciech Z. Misiolek, Richard M. Kelly. Extrusion of aluminum alloys. URL: <https://materialsdata.nist.gov/bitstream/handle/11115/164/Extrusion%20of%20Al%20Alloys.pdf?sequence=3> (дата обращения: 15.02.2018).
7. Pearson C.E. The extrusion of metals. London: Metal Industry, 1960.
8. Sheppard T. Extrusion of aluminum alloys. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 1999.
9. Зиновьев А.В., Колпашиков А.И., Полухин П.И., Глебов Ю.П. Технология обработки давлением цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1992.
10. Логинов Ю.Н. Прессование как метод интенсивной деформации металлов и сплавов: Учеб. пос. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016.
11. Галацкая И.К. Металлография металлургических дефектов в прессованных полуфабрикатах из алюми-

- ниевых сплавов. Куйбышев: Куйбыш. книж. изд-во, 1973.
12. *Riyadi Tri Widodo Besar, Siswanto Waluyo Adi*. The use Abaqus vor teaching the development of cavity defects in forward extrusion processes // *Int. J. Mech. Eng. Edikat*. 2008. Vol. 36. No. 3. P. 221—224.
 13. *Грабарник Л.М., Нагайцев А.А.* Прессование цветных металлов и сплавов. М.: Metallurgiya, 1991.
 14. *Щерба В.Н., Рэйтбарг Л.Х.* Технология прессования металлов. М.: Metallurgiya, 1995.
 15. *Логинов Ю.Н., Ершов А.А.* Моделирование в программном комплексе QFORM образования пресс-утяжины при прессовании // *Кузнеч.-штамп. пр-во. Обработка металлов давлением*. 2013. No. 7. С. 42—46.
 16. *Беляев А.П., Зайцев А.П., Лосицкий А.Ф., Ноздрин И.В., Огурцов А.Н., Савельев В.Н.* Способ прессования прутков и пресс-шайба для его осуществления: Пат. 2151013 (РФ). 2000.
 17. *Каргин В.Р., Егоров И.А.* Пресс-шайба: Пат. 2492013 (РФ). 2013.
 18. *Biswas Amit Kumar, Leventer Robert*. Extrusion member for positioning behind the rear face of material to be extruded in an extrusion press: Pat. 3919873 (USA). 1975.
 19. *Логинов Ю.Н.* Способ прессования металлов и устройство для его осуществления: Пат. 230699 (РФ). 2007.
 20. *Parvizian F., Kayser T., Horting C., Svendsen B.* Thermomechanical modeling and simulation of materials processing technology // *J. Mater. Process. Technol.* 2009. No. 209. P. 876—883.
 21. *Libura W., Rękas A.* Numerical modelling in designing aluminium extrusion // *Aluminum alloys: new trends in fabrication and applications* / Ed. Zaki Ahmad. InTech, 2012. P. 137—157. URL: <https://www.intechopen.com/books/aluminum-alloys-new-trends-in-fabrication-and-applications/numerical-modelling-in-designing-aluminium-extrusion> (дата обращения: 15.02.2018).
 22. *Stebunov S., Biba N., Lishny A., Jiao L.* Practical implementation of numerical modeling to optimization of extrusion die design for production of complex shape profiles // *Alum. Extrus. Finish*. 2013. No. 4. P. 20—24.
 23. *Каргин В.Р., Быков А.П., Каргин Б.В., Ерисов Я.А.* Моделирование процессов обработки металлов давлением в программе DEFORM-2D. Самара: МИР, 2010.
 24. *Sawtell R.R., Staley J.T.* Interactions between quenching and aging in alloy 7075 // *J. Alum.* 1983. No. 2. P. 127—133.
 25. *Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976.
- ## References
1. *Lukashenko V.N.* Obosnovanie tselesoobraznosti pressovaniya s koeffitsientom vytyazhki $\lambda < 10$ [Justification of the expediency of pressing with a drawing coefficient $\lambda < 10$]. *Tekhnologiya legkikh spлавov*. 1980. No. 5. P. 11—14.
 2. *Kargin V.R., Deryabin A.Y.* Characteristics of large bars extruding using small extrusion ratio. *Key Eng. Mater.* 2016. Vol. 644. P. 211—217.
 3. *Perlin I.L., Raitbarg L.Kh.* Teoriya pressovaniya metallov [Theory of metal pressing]. Moscow: Metallurgiya, 1975.
 4. *Bauser M., Sauer G., Siegert K.* Extrusion. USA: ASM International, 2006. 2nd ed.
 5. *Pradip K. Saha.* Aluminum extrusion technology. USA: ASM International. 2000.
 6. *Wojciech Z. Misiolek, Richard M. Kelly.* Extrusion of aluminum alloys. URL: <https://materialsdata.nist.gov/bitstream/handle/11115/164/Extrusion%20of%20Al%20Alloys.pdf?sequence=3> (accessed: 15.02.2018).
 7. *Pearson C.E.* The extrusion of metals. London: Metal Industry, 1960.
 8. *Sheppard T.* Extrusion of aluminum alloys. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 1999.
 9. *Zinov'ev A.V., Kolpashnikov A.I., Polukhin P.I., Glebov Yu.P.* Tekhnologiya obrabotki davleniem tsvetnykh metallov i spлавov [The technology of pressure treatment of non-ferrous metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1992.
 10. *Loginov Yu.N.* Pressovanie kak metod intensivnoi deformatsii metallov i spлавov [Pressing as a method of intensive deformation of metals and alloys]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2016.
 11. *Galatskaya I.K.* Metallografiya metallurgicheskikh defektov v pressovannykh polufabrikatakh iz alyuminievykh spлавov [Metallography of metallurgical defects in pressed semi-finished products of aluminum alloys]. Kuibyshev: Kuibyshevskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1973.
 12. *Riyadi Tri Widodo Besar, Siswanto Waluyo Adi*. The use Abaqus vor teaching the development of cavity defects in forward extrusion processes. *Int. J. Mech. Eng. Edikat*. 2008. Vol. 36. No. 3. P. 221—224.
 13. *Grabarnik L.M., Nagaitsev A.A.* Pressovanie tsvetnykh metallov i spлавov [Pressing of non-ferrous metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1991.
 14. *Shcherba V.N., Raitbarg L.Kh.* Tekhnologiya pressovaniya metallov [Technology of metal pressing]. Moscow: Metallurgiya, 1995.

15. Loginov Yu.N., Ershov A.A. Modelirovanie v programmnom komplekse QFORM obrazovaniya pressutyazhiny pri pressovanii [Modeling in the QFORM software complex the formation of press sagging during pressing]. *Kuznechno-shtampovoechnoe proizvodstvo. Obrabotka metallov davleniem*. 2013. No. 7. P. 42—46.
16. Belyaev A.P., Zaitsev A.P., Lositskii A.F., Nozdrin I.V., Ogurtsov A.N., Savel'ev V.N. Sposob pressovaniya prutkov i press-shaiba dlya ego osushchestvleniya [The method of pressing the rods and the press washer for its implementation]: Pat. 2151013 (RF). 2000.
17. Kargin V.R., Egorov I.A. Press-shaiba [Press washer]: Pat. 2492013 (RF). 2013.
18. Biswas Amit Kumar, Leventer Robert. Extrusion member for positioning behind the rear face of material to be extruded in an extrusion press: Pat. 3919873 (USA). 1975.
19. Loginov Yu.N. Sposob pressovaniya metallov i ustroistvo dlya ego osushchestvleniya [Method of pressing metals and the device for its implementation]: Pat. 230699 (RF). 2007.
20. Parvizian F., Kayser T., Horting C., Svendsen B. Thermo-mechanical modeling and simulation of materials processing technology. *J. Mater. Process. Technol.* 2009. No. 209. P. 876—883.
21. Libura W., Rękas A. Numerical modelling in designing aluminium extrusion. In: *Aluminum alloys: new trends in fabrication and applications*. Ed. Zaki Ahmad. InTech, 2012. P. 137—157. URL: <https://www.intechopen.com/books/aluminium-alloys-new-trends-in-fabrication-and-applications/numerical-modelling-in-designing-aluminium-extrusion> (accessed: 15.02.2018).
22. Stebunov S., Biba N., Lishny A., Jiao L. Practical implementation of numerical modeling to optimization of extrusion die design for production of complex shape profiles. *Alum. Extrus. Finish.* 2013. No. 4. P. 20—24.
23. Kargin V.R., Bykov A.P., Kargin B.V., Erisov Ya.A. Modelirovanie protsessov obrabotki metallov davleniem v programme DEFORM-2D [Modeling of metal forming processes in the DEFORM-2D program]. Samara: MIR, 2010.
24. Sawtell R.R., Staley J.T. Interactions between quenching and aging in alloy 7075. *J. Alum.* 1983. No. 2. P. 127—133.
25. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskii Yu.V. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh uslovii [Planning an experiment when searching for optimal conditions]. Moscow: Nauka, 1976.