

УДК 621.771.01

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОЙ СТАДИИ ПРЕССОВАНИЯ  
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПРУТКОВ ПРИ МАЛЫХ ВЫТЯЖКАХ  
В МОМЕНТ ОБРАЗОВАНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ПРЕСС-УТЯЖИНЫ**

© 2018 А.Ю. Дерябин, В.Р. Каргин

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 14.02.2018

Проведено компьютерное моделирование основной и заключительной стадий процесса прямого прессования крупногабаритных прутков с коэффициентами вытяжки  $l=3, 6, 8, 9, 14, 18$  из алюминиевого сплава 7075 при коэффициентах трения 0 и 0,5, углах конуса матрицы  $80^\circ$  и  $90^\circ$  из контейнера  $\varnothing 800$  мм на уникальном прессе 200 МН в программном пакете DEFORM-2D. Изучено влияние коэффициента вытяжки, коэффициента трения и угла конуса матрицы на распределение гидростатического давления, нормальных и касательных контактных напряжений, размеров пресс-остатков. Основным фактором, влияющим на формирование центральной пресс-утяжины в момент ее образования на заключительной стадии, оказывается коэффициент вытяжки и меньшей степени коэффициент трения и конусность матрицы. Предложена формула для выбора размеров пресс-остатка для конкретных условия прессования крупногабаритных круглых прутков с малыми коэффициентами вытяжки.

*Ключевые слова:* прямое прессование, крупногабаритные прутки, труднодеформируемый алюминиевый сплав 7075, пресс-утяжина, пресс-остаток, моделирование, коэффициент вытяжки, программа DEFORM-2D.

**ВВЕДЕНИЕ**

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

Заключительная стадия прессования крупногабаритных круглых прутков является важной среди других стадий процесса, так как на этой стадии происходит начало образования центральной пресс-утяжины, определяющей в основном размеры пресс-остатка и соответственно выход годного [3-8]. На момент начала образования центральной пресс-утяжины влияют множество факторов: коэффициент вытяжки, метод прессования, силы трения на поверхностях контейнера, матрицы и пресс-шайбы, гидростатическое давление в зоне деформации, природа прессуемого металла, температурное поле заготовки и инструмента, конструкция матриц и пресс-шайб и др. [3-15]. Большие силы трения на поверхности контейнера и малые

силы трения на поверхности пресс-шайбы способствуют образованию пресс-утяжины. Чем меньше угол наклона образующей конусной матрицы и больше степень деформации при прессовании, тем позднее начинается образование пресс-утяжины [3]. Менее нагретая пресс-шайба способствует уменьшению толщины пресс-остатка [10]. Прессование с рубашкой затрудняет течение металла по рабочей поверхности пресс-шайбы и этим способствует более позднему началу образования пресс-утяжины [13]. При обратном методе высота пресс-остатка меньше, чем при прямом методе [9].

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

$$H = K \times D_k, \quad (1)$$

где  $D_k$  – диаметр контейнера,  $K$  – эмпирический коэффициент, равный  $(0,22-0,25) \times D_k$  при прямом и  $(0,12-0,15) \times D_k$  при обратном прессовании [14].

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 образования центральной пресс-утяжины и характер распределения напряженного состояния мало изучен.

*Дерябин Андрей Юрьевич, аспирант.*

*E-mail: andrey77d@mail.ru*

*Каргин Владимир Родионович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры обработки металлов давлением.*

*E-mail: vrkargin@mail.ru*

Цель данной работы дать комплексный анализ влияния различных факторов на напряженное состояние в момент образования центральной пресс-утяжины и обосновать выбор размера пресс-остатка для конкретных условий прессования крупногабаритных круглых прутков с малыми вытяжками на основе расчетных зависимостей, полученных при компьютерном моделировании процесса.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При выборе размеров пресс-остатка важно знать особенности распределения напряжений в заключительной стадии процесса, когда происходит выпрессовывание объема очага пластической деформации.

Численное моделирование основной и заключительной стадии горячего прессования без смазки в настоящей работе реализовано средствами специализированного пакета программ DEFORM-2D на базе метода конечных элементов [16]. Числовые расчеты виртуального прямого прессования на горизонтальном гидравлическом прессе усилием 200 МН крупногабаритных цилиндрических прутков с диаметрами 188 мм (коэффициент вытяжки  $\lambda=18$ ), 214 мм ( $\lambda=14$ ), 265 мм ( $\lambda=9$ ), 283 мм ( $\lambda=8$ ), 326 мм ( $\lambda=6$ ), 460 мм ( $\lambda=3$ ), 560 мм ( $\lambda=2$ ) из труднодеформируемого алюминиевого сплава 7075 проведены из контейнера с внутренним диаметром 800 мм при реальных промышленных условиях: размеры цилиндрических заготовок  $D \times L = 785 \times 1000$  мм, температура нагрева заготовки 450 °С, матрицы, контейнера и пресс-шайбы соответственно равно 450 °С, 400 °С, 350 °С, скорость прессования 2,2 мм/сек, количество конечных элементов в заготовке 4000, коэффициент трения на контактных поверхностях пресс-шайбы, контейнера и «зеркала» матрицы принят по закону Зибеля равным 0,5, коэффициент теплопередачи – 11 кВт/(м<sup>2</sup>·град), материал инструмента ANSI-H-13, количество конечных элементов в пресс-шайбе – 2000, в матрице и контейнере – 5000. Моделирование реализовано при установившемся процессе прессования.

При постановке задачи компьютерного моделирования ее рассматривали как осесимметричную. Толщину слоя металла, находящегося в контейнере прессы на основной стадии процесса задавали равной половине диаметра контейнера, что перекрывает высоту очага деформации, а на заключительной стадии – моментом 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 образования центральной пресс-утяжины.

В связи с тем, что при значительном приближении пресс-шайбы к матрице изменяется поле напряжений, то для рассмотрения полной картины проведен численный анализ распределения гидростатического давления  $\sigma_{cp}$  по объему очага деформации, нормальных  $\sigma_z$  и касательных  $\tau_{RZ}$  напряжений на рабочей поверхности пресс-шайбы, размеров пресс-остатков в зависимости от следующих технологических и конструкционных параметров: величины контактного трения, угла конуса матрицы и коэффициента вытяжки на основной и заключительной стадиях прессования.

### АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В табл. 1 приведены результаты расчета среднего нормального напряжения (гидростатического давления)  $\sigma_{cp} = (\sigma_z + \sigma_R + \sigma_q)/3$  на основной стадии и в момент образования центральной пресс-утяжины при коэффициентах вытяжки  $\lambda=3$ ,  $\lambda=6$ , коэффициентах трения  $\mu=0$ ,  $\mu=0,5$  и углах конуса матрицы  $\alpha=80^\circ$ ,  $\alpha=90^\circ$ , где  $\sigma_z$ ,  $\sigma_R$ ,  $\sigma_q$  компоненты тензора напряжений.

Из анализа результатов по прямому прессованию круглых прутков с трением и без трения следует, что трение заметно изменяет картину распределения среднего нормального напряжения. На основной стадии процесса трение уменьшает величину  $\sigma_{cp}$  с 234 МПа до -212 МПа и максимальные значения, действующие на кромке канала матрицы  $\sigma_{cpmax}$  с 29,8 МПа до 22,8 МПа. На заключительной стадии наоборот, трение заметно увеличивает  $\sigma_{cp}$  с -206 МПа до -259 МПа и сохраняет максимальную величину практически неизменной. Это приводит к росту гидростатического давления в плоскости пресс-шайбы, сил трения и усилия прессования, создает условия для более раннего начала образования центральной пресс-утяжины, табл. 2

При прессовании в конические матрицы на основной стадии процесса в сравнении с прессованием в плоские матрицы установлено уменьшение  $\sigma_{cpmin}$  от -234 МПа до -191 МПа и  $\sigma_{cpmax}$  от 29,3 МПа до 22,4 МПа, на заключительной стадии уменьшение  $\sigma_{cpmin}$  от -206 МПа до -166 МПа и  $\sigma_{cpmax}$  от 29,4 МПа до 25,9 МПа. Это создает условия для позднего начала образования пресс-утяжины, табл. 2. Результаты прессования прутков с  $\lambda=3$  говорят о снижении гидростатического давления в очаге деформации по сравнению с прессованием с  $\lambda=6$ . На основной стадии процесса  $\sigma_{cpmin}$  уменьшилось с -234 МПа до -182 МПа, а  $\sigma_{cpmax}$  с 29,3 МПа до 28,2 МПа. На заключительной стадии  $\sigma_{cpmin}$  уменьшилось с -206 МПа до -159 МПа, а  $\sigma_{cpmax}$  увеличилось с 29,4 МПа до 30,4 МПа. В связи с уменьшением питающего объема металла в поперечном направлении это создает условия для более раннего начала образования пресс-утяжины, табл. 2.

**Таблица 1.** Результаты расчета гидростатического давления  $\sigma_{cp}$

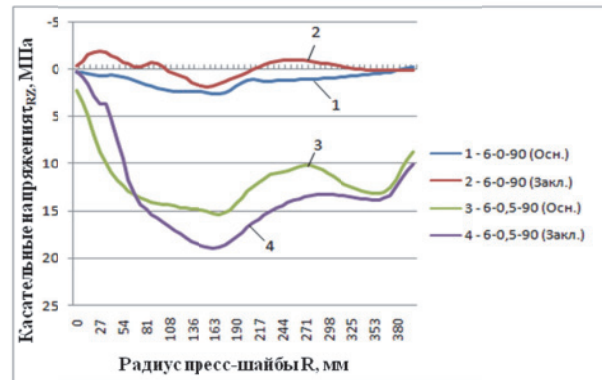
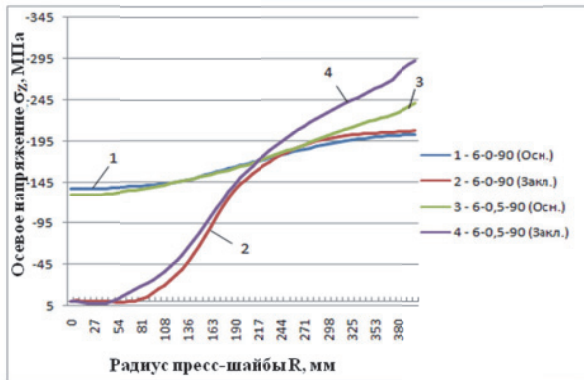
Номер опыта	Вытяжка $\lambda$	Коэффициент трения $\mu$	Угол конуса матрицы $\alpha$	$\sigma_{срmin}$ , МПа		$\sigma_{срmax}$ , МПа	
				стадии		стадии	
				основная	заключительная	основная	заключительная
1	6	0	90	-234	-206	29,3	29,4
2	6	0,5	90	-212	-259	22,8	29,8
3	6	0	80	-191	-166	22,4	25,9
4	3	0	90	-182	-159	28,2	30,4

**Таблица 2.** Зависимость высоты пресс-остатка от коэффициента вытяжки, коэффициента трения и угла конуса матрицы

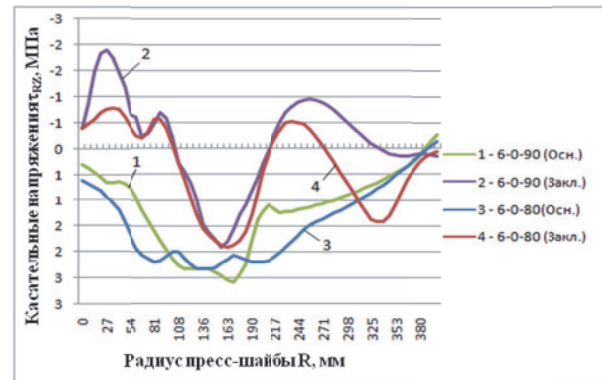
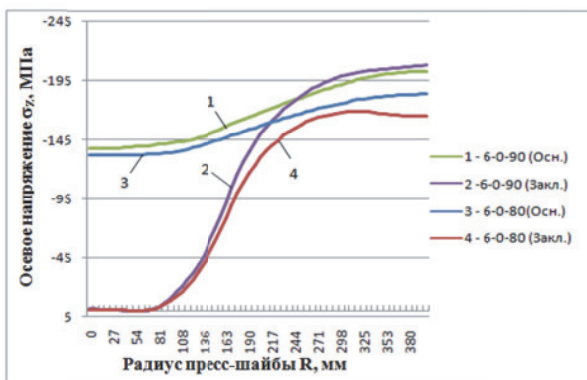
Вытяжка, $\lambda$	Коэффициент трения $\mu$	Конус угла матрицы $\alpha$ , °	Высота прессостатка Н, мм
6	0	90	103
6	0,5	90	109,4
6	0	80	98,7
3	0	90	170,9

На рис. 1-3 приведены графики распределения нормальных  $\sigma_z$  и касательных  $\tau_{RZ}$  напряжений на контактной поверхности заготовки и пресс-шайбы в основной и заключительной ста-

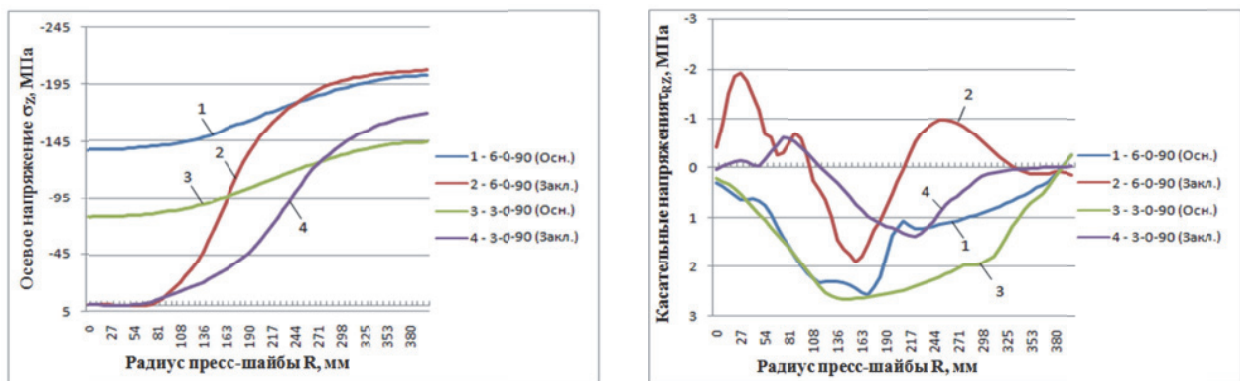
диях прямого прессования при коэффициентах трения  $\mu=0$  и  $\mu=0,5$ , углах конуса матрицы  $\alpha=80^\circ$  и  $\alpha=90^\circ$ , коэффициентах вытяжки  $\lambda=3$  и  $\lambda=6$ . Из характера изменения кривых 1 и 3 как функции



**Рис. 1.** Влияние трения на распределение осевых и касательных контактных напряжений при коэффициенте вытяжки  $\lambda = 6$ , коэффициентах трения  $\mu = 0, \mu = 0,5$ , угле конуса матрицы  $\alpha = 90^\circ$  на основной стадии процесса и в момент начала образования пресс-утяжины



**Рис. 2.** Влияние угла конуса матрицы на распределение осевых и касательных контактных напряжений на пресс-шайбе при коэффициенте вытяжки  $\lambda = 6$ , коэффициенте трения  $\mu = 0$ , углах конуса матрицы  $\alpha = 80^\circ, \alpha = 90^\circ$  на основной стадии процесса и в момент начала образования пресс-утяжины



**Рис. 3.** Влияние степени деформации при коэффициенте трения  $\mu = 0$ , коэффициентах вытяжки  $\lambda = 3, \lambda = 6$ , угле конуса матрицы  $\alpha = 90^\circ$  на основной стадии процесса и в момент начала образования центральной пресс-утяжины

радиуса заготовки видно, что нормальное напряжение на основной стадии достигает наибольших значений в зоне контакта пресс-шайбы со стенкой контейнера. По мере удаления от стенок контейнера  $\sigma_z$  плавно уменьшается, достигая минимальных значений на оси прессования. Прессование с  $\mu=0,5$  в сравнении с  $\mu=0$  приводит к росту  $\sigma_z$  у стенок контейнера на 16 %, (рис. 1, кривые 1,3). При прессовании в коническую матрицу с  $\alpha=80^\circ$  (рис. 1, кривые 1,3) и прессовании с  $\lambda=3$  (рис. 1, кривые 1,3) наоборот, отмечено уменьшение  $\sigma_z$  на 10 и 30% соответственно.

На заключительной стадии процесса в момент начала образования центральной пресс-утяжины картина распределения нормального напряжения  $\sigma_z$  существенно меняется (рис. 1-3, кривые 2,4). В переходной зоне между центральными и периферийными слоями заготовки наблюдается резкое падение  $\sigma_z$  вплоть до нулевых значений при  $R=0,5R_{np}$ , где  $R_{np}$  – радиус прутка. Прессование с  $\mu=0,5$  в сравнении с  $\mu = 0$  приводит к росту  $\sigma_z$  в зоне контакта пресс-шайбы с контейнером на 40 %, (рис. 1, кривые 1,4). При прессовании в коническую матрицу с  $\alpha=80^\circ$  (рис. 2, кривые 1,4) и прессование с  $\lambda=3$  (рис. 3, кривые 1,4) наоборот, отмечено уменьшение  $\sigma_z$  на 21 и 18% соответственно.

При переходе от основной стадии к заключительной из сравнения максимальных значений  $\sigma_z$  видно, что при прессовании круглых прутков нормальное напряжение  $\sigma_z$  при  $\mu=0,5$  выросло на 30% (рис. 1, кривые 3,4), уменьшилось на 21 % при  $\alpha=80^\circ$  (рис. 2, кривые 3,4) и на 18 % при  $\lambda=3$  (рис. 3, кривые 3,4).

Анализ результатов по влиянию величины трения на распределение касательных напряжений на контактной поверхности пресс-шайбы показывает, что  $\tau_{rz}$  в основной стадии при  $\mu = 0$  достаточно малы и направлены к стенке контейнера (рис. 1, кривая 1). Характер распределения  $\tau_{rz}$  при  $\mu = 0$  меняется на заключительной стадии процесса. Касательные напряжения положительны только в срединных

слоях заготовки, (рис.1, кривая 2). Величина касательных напряжений значительно возрастает при прессовании с  $\mu = 0,5$  по сравнению с  $\mu = 0$  и достигает до 15-20 МПа, (рис. 1, кривые 3,4). Графики  $\tau_{rz}$  имеют два экстремума. Первый экстремум находится над кромкой калибрующего пояса, второй в периферийном слое, прилегающем к стенке контейнера. При переходе от основной стадии к заключительной отмечен рост величины касательных напряжений (рис.1, кривые 3,4).

На основной стадии процесса при прессовании в плоские и конические матрицы характер распределений графиков  $\tau_{rz}$  в целом одинаков, (рис. 2, кривые 1,3). Касательные напряжения достигают экстремальных значений над кромкой калибрующего пояса и равны 2-3 МПа. Картина распределения  $\tau_{rz}$  существенно меняется на заключительной стадии, (рис. 2, кривые 2,4). Наблюдаются три основных экстремума, вызванных характером течения металла заготовки в поперечном направлении. В точках экстремума на поверхности пресс-шайбы радиальная скорость течения либо меняет знак, либо принимает минимальное значение. При прессовании в коническую матрицу амплитуда изменения  $\tau_{rz}$  меньше, чем при прессовании в плоскую матрицу.

С увеличением коэффициента вытяжки на основной стадии процесса  $\tau_{rz}$  уменьшается на участке пресс-шайбы, расположенной над зеркалом матрицы, (рис. 3, кривые 1,3). В связи с этим течение металла при  $\lambda=3$  затруднено в поперечном направлении, что обеспечивает более раннее начало образования центральной пресс-утяжины. В заключительной стадии картина распределения  $\tau_{rz}$ , (рис. 3, кривые 2,4) аналогична рис. 2, кривые 2,4. При прессовании с  $\lambda=6$  амплитуда изменения  $\tau_{rz}$  значительно больше, чем при прессовании с  $\lambda=3$ . Характер изменения  $\tau_{rz}$  (рис. 3, кривая 2) указывает на турбулентное движение периферийных слоев прессуемого металла, примыкающих к пресс-шайбе.

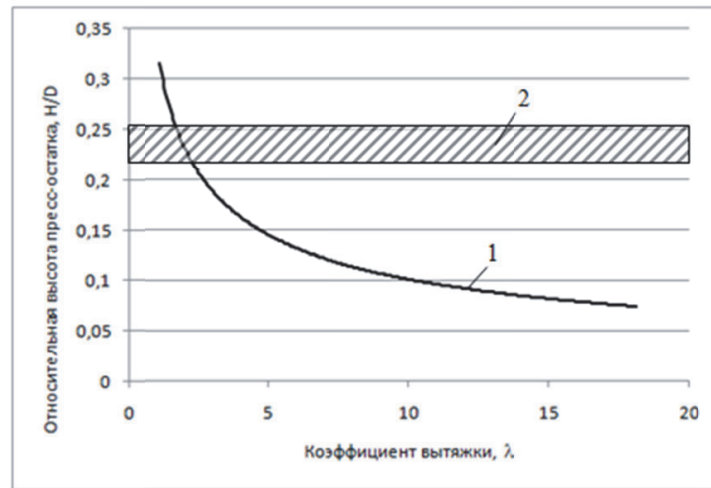


Рис. 4. График изменения относительной высоты пресс-остатка  $H/D_k$  в зависимости от коэффициента вытяжки  $\lambda$

При моделировании в программе DEFORM проведен также расчет величин прессостатков в момент начала образования пресс-утяжин для прессования крупногабаритных круглых прутков с различными коэффициентами вытяжки 2, 3, 6, 8, 9 14, 18 в условиях реального производства. По полученным данным высот пресс-остатков с помощью метода наименьших квадратов на рис.4 построена аппроксимирующая кривая (1) в координатах  $H/D_k - \lambda$ .

$$\frac{H}{D_k} = 0,302 - 0,03\lambda + 0,001\lambda^2. \quad (2)$$

Из анализа полученной формулы (2) видно, что при уменьшении коэффициента вытяжки высота пресс-остатка (H) резко возрастает по экспоненте, поэтому при прессовании с малыми коэффициентами вытяжки  $\lambda < 15$  целесообразно производить выбор размеров пресс-остатка H не по формуле (1), отражающей на рис. 4 область 2, а в зависимости от заданного коэффициента вытяжки по формуле (2). Это позволит увеличить выход годного.

### ВЫВОДЫ

1. Дан комплексный анализ влияния различных технологических и конструкционных факторов на характер распределения гидростатического давления по объему очага деформации, нормальных и касательных напряжений на рабочей поверхности пресс-шайбы в основной и заключительной стадиях прессования крупногабаритных круглых прутков из труднодеформируемых алюминиевых сплавов.

2. На заключительной стадии в момент образования центральной пресс-утяжины при прессовании с большим трением наблюдается существенный рост гидростатического давления. При прессовании в конические матрицы и

малыми коэффициентами вытяжки гидростатическое давление падает в сравнении с гидростатическим давлением в основной стадии.

3. Контактное давление на пресс-шайбе при переходе от основной стадии к заключительной при прессовании с трением увеличилось на 30 % и уменьшилось на 21 и 18 % при прессовании в конические матрицы и прессовании с малыми вытяжками соответственно.

4. Касательные напряжения на пресс-шайбе при переходе от основной стадии к заключительной, при прессовании с трением, значительно увеличиваются, что уменьшает скорость течения в поперечном направлении и способствует более раннему моменту образования центральной пресс-утяжины.

5. Среди рассмотренных факторов главное влияние на формирование центральной пресс-утяжины в момент ее образования оказывает коэффициент вытяжки и меньшей степени коэффициент трения и конусность матрицы.

6. Предложена расчетная формула для выбора толщины пресс-остатка для конкретных условия прессования крупногабаритных круглых прутков с малыми вытяжками.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукашенко В.Н. Обоснование целесообразности прессования с коэффициентом вытяжки  $l < 10$  // Технология 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 Engineering Materials. 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. ASM International. 2nd edition (December 1, 2006).
5. Pradip K. Saha Aluminum extrusion technology. USA: ASM International. 2000.
6. Aluminum Extrusion Manual - Aluminum Extruders

- Couneil and the Aluminum Assoiation.1998.
7. *Pearson C.E.* The extrusion of metals. - London: Metal Industry.1960.
  8. *Sheppard T.* Extrusion of Aluminum Alloys – Dordrecht/Boston/London: Kliwer Academie Publihers.1999.
  9. Технология обработки давлением цветных металлов и сплавов / *А.В. Зиновьев, А.И. Колпашиников, П.И. Полухин, Ю.П. Глебов.* М.: Металлургия, 1992.
  10. *Логинов Ю.Н.* Прессование как метод интенсивной деформации металлов и сплавов: учебное пособие. Екатеринбург: изд-во Урал. ун-та, 2016.
  11. *Галацкая И.К.* Металлография металлургических дефектов в прессованных полуфабрикатах из алюминиевых сплавов. Куйбышев. Куйбышевское книжное издательство, 1973.
  12. *Riyadi, Tri Widodo Besar.* The use Abaqus vor teaching the development of cavity defects in forward extrusion processes // International Journal of Mechanical Engineering Edikation. 2008. V.36.№ 3, P. 221-224.
  13. *Грабарник Л.М., Нагайцев А.А.* Прессование цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1991.
  14. *Щерба В.Н., Райтбарг Л.Х.* Технология прессования металлов. М.: Металлургия, 1995.
  15. *Логинов Ю.Н., Еришов А.А.* Моделирование в программном комплексе QFORM образование пресс-утяжины при прессовании // Кузнечно-штамповое производство. Обработка металлов давлением. 2013 No 7. С. 42-46.
  16. Моделирование процессов обработки металлов давлением в программе DEFORM-2D // *В.Р. Каргин, А.П. Быков, Б.В. Каргин, Я.А. Ерисов.* Самара: МИР, 2010.

### FINAL STAGE MODELING OF LARGE-SIZE BARS EXTRUSION BY LOW SRETCH RATIO WHILE CREATION OF CENTRAL BACK-END EXTRUSION DEFECT

© 2018 A.Y. Deryabin, V.R. Kargin

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

It was done computer modeling of main and final stages of large-size bars in direct extrusion method with extrusion ratio  $l=3, 6, 8, 9, 14, 18$  from aluminum alloy 7075 with friction ratio 0 and 0,5, and die cone angles  $80^\circ$  and  $90^\circ$  from container  $\varnothing 800$  at the unique press 200 MH in the software program package DEFORM-2D. It was studied the influence of extrusion ratio, friction ratio and die cone angle on the distribution of hydrostatic pressure, normal and tangential contact stresses, dimensions of butt-ends. The main factors, influenced on the creation of central back-end extrusion defect at its final stage, are extrusion ratio, in a less degree friction ratio and cone ratio. It was offered a formula to choose the dimensions of butt-ends for precise extrusion conditions of large-size bars with low extrusion ratio  
*Keywords:* extrusion, large bars, difficult-to-form 7075 alloy, back-end extrusion defect, butt-end, simulation, extrusion ratio factor, program DEFORM.

---

*Andrey Deryabin, Graduate Student.*  
*E-mail: andrey77d@mail.ru*  
*Vkadimir Kargin, Doctor of Technics, Associate Professor,*  
*Professor at the Metal Forming Department.*  
*E-mail: vrkargin@mail.ru*