

УДК 621.7 : 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МЕТАЛЛОВ

© 2014 г. **О.Ю. Агапитова, А.Г. Залазинский**

Институт машиноведения (ИМАШ) УрО РАН, г. Екатеринбург

Статья поступила в редакцию 28.02.13 г., доработана 17.03.14 г., подписана в печать 24.03.14 г.

Осуществлены имитационное моделирование и экспериментальное исследование процесса гидромеханического выдавливания труднообрабатываемых материалов. Изучено влияние технологических параметров на показатель поврежденности и удельное напряжение выдавливания. С использованием системы компьютерной математики MATLAB выполнен регрессионный анализ результатов вычислительного эксперимента. На примере исследования алюминиевого сплава АМг5 определены оптимальные параметры процесса гидромеханического выдавливания по критерию минимальной поврежденности деформируемого материала.

Ключевые слова: гидромеханическое выдавливание, имитационное моделирование, MATLAB, поврежденность.

There was performed simulation modelling and experimental research with regard to process of hydraulic-mechanical squirting of hard to machine material. There was examined influence of technological parameters on index of damage and specific stress of squirting. With the aid of computer-based system MATLAB was performed regression analysis of simulation experiment results. In the context of aluminium alloy Amr5 investigation was determined optimal parameters of hydraulic-mechanical squirting process on criterion of minimal damage of deformed material.

Key words: hydraulic-mechanical squirting, simulation modelling, MATLAB, damage.

При изготовлении прутковых изделий из труднообрабатываемых материалов, к которым относятся многие цветные металлы, методом выдавливания требуется обеспечение минимального усилия деформирования при максимальной вытяжке, а также минимальной поврежденности деформируемого прутка. При этом возникает проблема налипания материалов на инструмент. Выполненные ранее исследования [1–3] показали, что для устранения этого недостатка используют различные технические и технологические приемы, наибольшее распространение из которых получило гидропрессование. Проблемы данного метода заключаются в обеспечении высокого давления жидкости и разработке уплотнений оборудования для создания герметичности полостей оснастки [2]. Под высоким давлением жидкости в заключительной стадии процесса прессования заготовка разгоняется до скорости выстрела из очага матрицы, что приводит к непрогнозируемому изменению формы заготовки и вероятному раз-

рушению деталей технологического оборудования [3]. В связи с этим для получения прутковых изделий из труднообрабатываемых материалов предлагается применять метод гидромеханического выдавливания. Схема данного процесса, которую использовали для моделирования, показана на рис. 1.

В соответствии с предложенной схемой конической частью пуансона 5 задний конец заготовки 3 распрессовывается на стенки рабочей втулки 4, предотвращая утечку рабочей среды 2 в направлении, противоположном перемещению заготовки. При этом за счет осадки заготовки давление рабочей среды (смазки) увеличивается до значения, необходимого для выдавливания из очага матрицы ее тонкого слоя, обеспечивающего режим гидродинамического трения. При этом в очаге деформации смазка (рабочая среда) опережает движение заготовки. Свойства рабочей среды при имитационном моделировании задавали, ориентируясь на свойства пластопарафина, которые определены в работе [4].

Агапитова О.Ю. – программист лаборатории системного моделирования ИМАШ УрО РАН (620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34). Тел.: (343) 375-35-90. E-mail: agapitova.olesya@yandex.ru.

Залазинский А.Г. – докт. техн. наук, проф., зав. этой лабораторией. Тел.: (343) 374-50-51. E-mail: zalaz@list.ru; zal@imach.uran.ru.

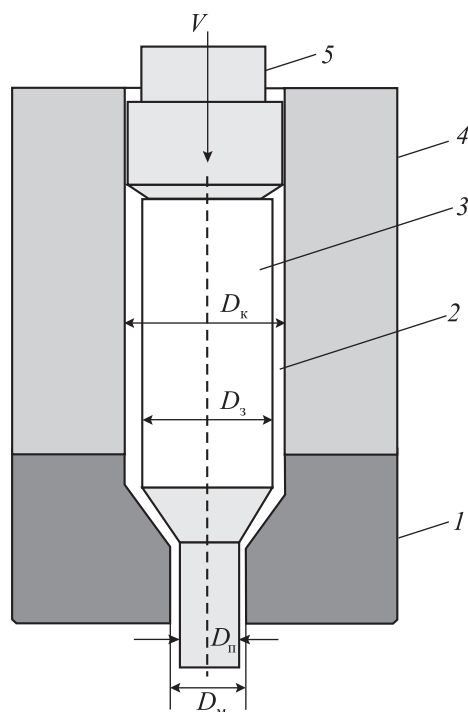


Рис. 1. Схема гидромеханического выдавливания

1 — матрица с цилиндрической заходной частью; 2 — слой рабочей среды, одновременно выполняющей роль смазки; 3 — заготовка, размещенная в рабочей втулке 4 контейнера; 5 — пуансон
 D_K , D_3 , $D_П$ и D_M — диаметры соответственно контейнера, заготовки, прутка и матрицы

Процесс получения прутков из малопластичных и труднообрабатываемых материалов в настоящее время недостаточно изучен. Представляет интерес исследование влияния различных технологических параметров на усилие деформирования, выявление предельных степеней деформаций, обеспечивающих выдавливание без разрушения, с возможностью автоматизации проектирования данного процесса, а также определение оптимального давления рабочего тела на боковую поверхность заготовки.

В связи с вышесказанным, важным для производства прутков является проведение исследований, основанных на моделировании процесса гидромеханического выдавливания, включающих анализ напряженно-деформированного состояния, энергосиловых параметров, а также ресурса пластичности деформируемого материала и показателя поврежденности [4]. Далее необходима разработка научно-обоснованных рекомендаций, способствующих повышению производительности процесса, обеспечивающих бездефектность продукции и снижающих затраты на формоизменение.

Для изучения процесса выдавливания жидкостью применяют те же аналитические методы, что и для обычного выдавливания [5]. Основными теоретическими методами являются классический энергетический метод, метод верхней оценки, метод линий скольжения. Все они до некоторой степени эффективны для анализа задачи, однако недостаточны, когда следует учитывать упругую деформацию и обобщенные граничные условия. Для решения таких задач используют метод муаровых полос [6] и полуклассический визиопластический метод, однако их применение ограничивается большой трудоемкостью экспериментов. Чтобы избежать этих затруднений, для анализа гидромеханического выдавливания используют метод конечных элементов [7].

Цель работы — осуществить имитационное моделирование процесса гидромеханического выдавливания и на примере выдавливания сплава АМг5 определить оптимальные параметры процесса по критерию минимальной поврежденности деформируемого материала.

При этом необходимо:

- установить минимальное давление рабочего агента на боковую поверхность заготовки для реализации процесса выдавливания;
- исследовать влияние трения, давления на боковую поверхность заготовки и вытяжки на удельное напряжение выдавливания, провести дисперсионный анализ;
- изучить влияние технологических параметров на накопление поврежденности в процессе деформирования;
- выполнить регрессионный анализ результатов вычислительного эксперимента, определить коэффициенты в уравнениях регрессии;
- выявить оптимальные параметры процесса гидромеханического выдавливания.

Основными факторами, определяющими энергосиловые характеристики процесса гидромеханического выдавливания, являются скорость деформации, коэффициент вытяжки, коэффициент трения, вид напряженного состояния и др. Это обуславливает трудности экспериментального исследования поврежденности и удельного напряжения выдавливания, так как довольно сложно учесть влияние каждого из указанных факторов и обеспечить постоянство условий эксперимента. Поэтому необходимо проведение вычислительных опытов с использованием метода планирования эксперимента.

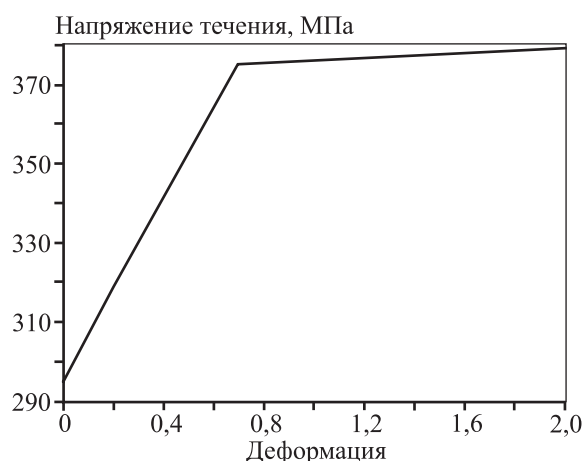


Рис. 2. Кривая напряжения–деформации исследуемого материала

Для определения минимально необходимого давления на боковую поверхность заготовки выполнили компьютерное моделирование в пакете «Deform2D». В качестве изучаемого материала выбран алюминий марки АМг5 (зарубежный аналог Al-5056). Кривая напряжения–деформации представлена на рис. 2. Решалась задача осесимметричного деформирования: деформируемая среда — пластическая; конечные элементы — многоугольники; количество элементов — 1000; материал заготовки до деформирования изотропен и однороден; варьируемая величина — давление на боковую поверхность заготовки; скорость движения пуансона $v = 0,03$ мм/с.

Поставленная задача реализуется путем решения серии компьютерных экспериментов. Величина давления на боковую поверхность заготовки (q) варьировалась от 50 до 400 МПа с шагом 10 МПа.

По результатам этих экспериментов установлено, что при боковом давлении от 50 до 100 МПа происходит распрессовка заготовки на стенки рабочей втулки в три стадии. На первой стадии выдавливания распрессовывается задний конец заготовки, на второй — имеет место процесс бочкообразования, появляются две полости (на рис. 3 показаны стрелками), в которых распределяется рабочий агент. Дальнейшее повышение усилия на пуансоне позволяет реализовать процесс выдавливания.

Выявлено, что при давлении на боковую поверхность заготовки $q = 50$ МПа усилие выдавливания достигает значения $P = 28000$ Н, а при $q = 100$ МПа — не превышает 14000 Н, т.е. снижается в 2 раза (рис. 4). Таким образом, полагали, что для

реализации процесса деформирования минимально необходимым является давление 100 МПа.

Для определения многофакторной зависимости поврежденности и удельного напряжения выдавливания выбрали такие планы эксперимента, которые обеспечивают минимизацию ошибки эксперимента и позволяют оценить влияние управляющих факторов. Для выбора вариантов проведения компьютерных экспериментов, объективного сопоставления влияния технологических параметров применяли статистические методы планирования эксперимента.

Сделаем предположение, что в результате эксперимента будут найдены математические модели (1), (2):

$$\tilde{p}^{(ijk)} = p_{cp} + \Phi_i(f) + \Phi_j(\mu) + \Phi_k(q) + E_{ijk}, \quad (1)$$

где $\tilde{p}^{(ijk)} = p^{(ijk)}/\sigma_{s0}$ — удельное напряжение выдавливания; $p^{(ijk)}$ — напряжение выдавливания; σ_{s0} — начальный предел текучести; $p_{cp} = p/\sigma_{s0}$ — среднее удельное напряжение выдавливания в результате всех опытов; $\Phi_i(f)$, $\Phi_j(\mu)$, $\Phi_k(q)$ — эффекты трения, коэффициента вытяжки и давления на боковую поверхность соответственно; E_{ijk} — случайная ошибка эксперимента; i, j, k — номера факторов $\Phi_i(f)$, $\Phi_j(\mu)$, $\Phi_k(q)$.

$$\omega^{(ijk)} = \omega_{cp} + H_i(f) + H_j(\mu) + H_k(q) + J_{ijk}, \quad (2)$$

где $\omega^{(ijk)}$ — показатель поврежденности Кокрофта—Латама; ω_{cp} — средний показатель поврежденности Кокрофта—Латама в результате всех опытов; $H_i(f)$, $H_j(\mu)$, $H_k(q)$ — эффекты трения, коэффициента вытяжки и давления на боковую поверхность заготовки соответственно; J_{ijk} — случайная ошибка эксперимента; i, j, k — номера факторов $H_i(f)$, $H_j(\mu)$, $H_k(q)$.

Для проведения исследования использовали планирование эксперимента по типу латинского квадрата. Схема планирования и результаты приведены в табл. 1. Каждый из трех факторов назначался на четырех уровнях. Столбцы табл. 1 отвечают

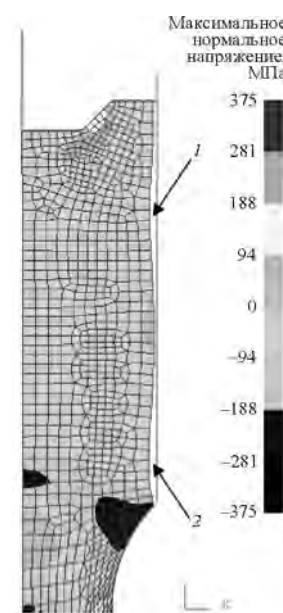


Рис. 3. Распрессовка заготовки на стенки рабочей втулки
1, 2 — полости

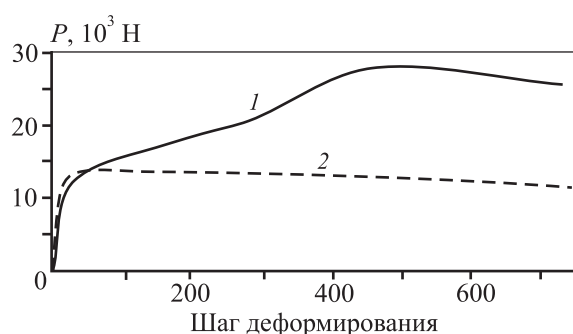


Рис. 4. Зависимость усилия выдавливания от шага деформирования при боковом давлении 50 (1) и 100 (2) МПа

Таблица 1

План и результаты исследования гидромеханического выдавливания

| Коэффициент трения f | Параметры процесса | Коэффициент вытяжки μ | | | |
|------------------------|--------------------|---------------------------|-------|-------|-------|
| | | 2 | 4 | 6 | 8 |
| 0,01 | q , МПа | 100 | 200 | 300 | 400 |
| | $P \cdot 10^4$, Н | 2,71 | 4,22 | 5,2 | 6,37 |
| | ω | 0,308 | 0,293 | 0,172 | 0,175 |
| 0,02 | q , МПа | 200 | 100 | 400 | 300 |
| | $P \cdot 10^4$, Н | 2,14 | 4,32 | 5,45 | 6,61 |
| | ω | 0,32 | 0,31 | 0,205 | 0,179 |
| 0,03 | q , МПа | 300 | 400 | 100 | 200 |
| | $P \cdot 10^4$, Н | 2,46 | 4,36 | 5,75 | 6,67 |
| | ω | 0,271 | 0,184 | 0,17 | 0,239 |
| 0,04 | q , МПа | 400 | 300 | 200 | 100 |
| | $P \cdot 10^4$, Н | 2,68 | 4,53 | 5,7 | 6,82 |
| | ω | 0,326 | 0,164 | 0,12 | 0,176 |

уровням варьирования коэффициента вытяжки от 2 до 8; строкам соответствуют уровни коэффициента трения от 0,01 до 0,04; давление на боковую поверхность заготовки менялось от 100 до 400 МПа. В выделенных ячейках табл. 1 расположены расчетные величины: усилие деформирования P и показатель поврежденности ω . Для проведения дисперсионного анализа применяли расчетную схему [8, 9]. Моделирование процесса гидромеханического выдавливания производилось с использованием пакета «Deform2D». Исходные размеры заготовки — $D = 9$ мм, $L = 22$ мм, оптимальный угол матрицы — 29° согласно [10].

Результаты вычислительного эксперимента могут быть представлены в виде графиков, отража-

ющих влияние давления на боковую поверхность заготовки (бокового давления), трения и коэффициента вытяжки на удельное напряжение выдавливания (рис. 5).

Провели проверку гипотезы о существенности влияния действия факторов на изменение удельного напряжения выдавливания и поврежденности путем сравнения дисперсий по факторам и остаточной дисперсии, пользуясь критерием Фишера $F_{кр}$. Посредством анализа полученных данных можно сделать вывод о том, что наибольшее влияние на удельное напряжение выдавливания оказывает величина коэффициента вытяжки μ ($F_2(\mu) > F_{кр}$). Наименьшее влияние на удельное напряжение выдавливания оказывает коэффициент трения, поскольку $F_1(f) < F_{кр}$.

Изучили значимость технологических параметров на накопление поврежденности в процессе деформирования. Построили зависимости, отражающие влияние трения, коэффициента вытяжки и бокового давления на показатель поврежденности Кокрофта—Латама (рис. 6). Выявлено, что все три

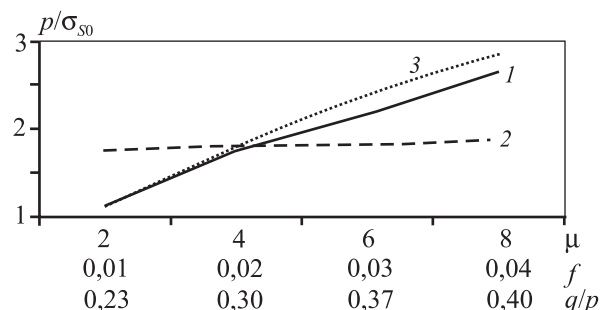


Рис. 5. Зависимость удельного напряжения выдавливания от коэффициента вытяжки (1), коэффициента трения (2) и отношения бокового давления к напряжению выдавливания (3)

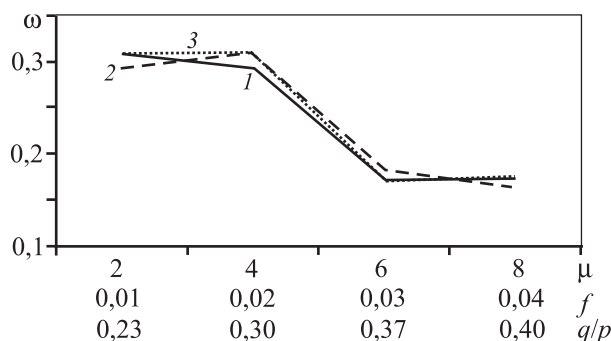


Рис. 6. Зависимость поврежденности от коэффициента вытяжки (1), коэффициента трения (2) и отношения бокового давления к напряжению выдавливания (3)

фактора приближенно одинаково оказывают влияние на исследуемую величину.

Согласно результатам вычислительного эксперимента, для описания показателя поврежденности выбрали математическую модель

$$\omega = b_1 + b_2\mu + b_3\frac{q}{p} + b_4\mu\frac{q}{p} + b_5\mu^2 + b_6\left(\frac{q}{p}\right)^2, \quad (3)$$

где ω — показатель поврежденности Кокрофта—Латама; μ — коэффициент вытяжки; q/p — отношение бокового давления к напряжению выдавливания; b_1 — b_6 — постоянные коэффициенты.

Для определения зависимости (3) выполнили регрессионный анализ результатов экспериментов, приведенных в табл. 1 и на рис. 7. Статистическая обработка экспериментальных данных с использованием системы компьютерной математики MATLAB позволила получить следующее уравнение регрессии:

$$\omega = 1,1537 + 0,0872\mu - 5,789\frac{q}{p} - 0,0329\mu\frac{q}{p} - 0,0062\mu^2 + 7,0712\left(\frac{q}{p}\right)^2.$$

Анализ результатов моделирования дал возможность установить оптимальные параметры процесса гидромеханического выдавливания из условия минимизации показателя поврежденности. При коэффициенте вытяжки $\mu = 2$ и отношении $q/p = 0,42$ показатель поврежденности Кокрофта—Латама равен $\omega = 0,0917$. Поскольку при производстве прутковых изделий имеет место ограничение коэффициента вытяжки: $\mu \geq 4$, то оптимальными параметрами будут являться значения, соответствующие $q/p = 0,42$. Так, величина ω возрастает от 0,1639 до 0,1863 при изменении коэффициента вытяжки μ от 4 до 6. Дальнейшее увеличение μ приводит к снижению показателя поврежденности до $\omega = 0,1789$ и 0,159 при $\mu = 7$ и 8 соответственно. Оптимальная величина отношения бокового давления к напряжению выдавливания остается постоянной и равной $q/p = 0,42$.

На основании результатов, полученных при моделировании процесса гидромеханического выдавливания алюминиевого сплава, для описания величины удельного напряжения выдавливания выбрали математическую модель

$$p/\sigma_{s0} = a_1 + a_2\mu + a_3q/p + a_4\mu q/p + a_5\mu^2, \quad (4)$$

где a_1 — a_5 — постоянные коэффициенты.

С использованием системы компьютерной математики MATLAB построили зависимость удельного

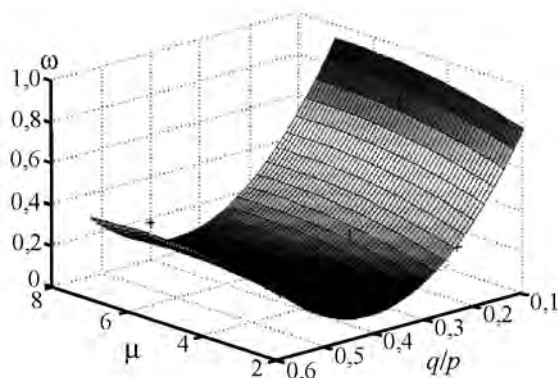


Рис. 7. Зависимость показателя поврежденности (ω) от вытяжки (μ) и отношения бокового давления к напряжению выдавливания (q/p)

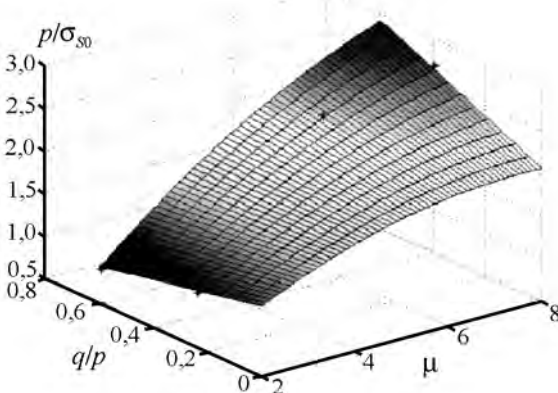


Рис. 8. Зависимость отношения удельного напряжения выдавливания (p/σ_{s0}) от вытяжки (μ) и отношения бокового давления к напряжению выдавливания (q/p)

напряжения выдавливания от коэффициента вытяжки и отношения бокового давления к напряжению выдавливания (рис. 8).

Статистическая обработка экспериментальных данных с использованием системы MATLAB позволила получить следующее уравнение регрессии:

$$p/\sigma_{s0} = 0,6899 + 0,3594\mu - 1,3655q/p + 0,3526\mu q/p - 0,0238\mu^2.$$

По результатам моделирования (см. рис. 5) можно сделать вывод о том, что при увеличении коэффициента вытяжки удельное напряжение выдавливания растет от 0,9 до 2,86. Так, при значении $\mu = 7$ удельное напряжение выдавливания $p/\sigma_{s0} = 2,5$, отношение $q/p = 0,42$.

Для оценки достоверности результатов выполненного имитационного моделирования было проведено экспериментальное исследование процесса

Таблица 2
Результаты экспериментального исследования
и имитационного моделирования

| μ | Модель | p/σ_{s0} | Погрешность расчета, % |
|-------|--------------|-----------------|---------------------------|
| 2 | Имитационная | 1,036 | 4,95 |
| | Эксперимент | 1,09 | |
| 4 | Имитационная | 1,766 | 2,43 |
| | Эксперимент | 1,81 | |
| 6 | Имитационная | 2,305 | 0,65 |
| | Эксперимент | 2,32 | |

гидромеханического выдавливания с использованием устройства [11].

В качестве рабочей среды и смазки для выдавливания заготовок из сплава алюминия марки АМг5 опробовали плаstopарафин. Исходные заготовки длиной 22 мм были получены из прутка диаметром 9 мм. Для реализации плана эксперимента изготовили три матрицы для вытяжек $\mu = 2, 4$ и 6. Для каждой экспериментальной точки выдавили по два образца. Результаты экспериментального исследования и имитационного моделирования показаны в табл. 2. В ее ячейках приведены средние значения удельного напряжения выдавливания, подсчитанные по двум опытам. Погрешность расчета по отношению к экспериментальным данным находится в пределах от 0,65 до 4,95 % и уменьшается с увеличением коэффициента вытяжки.

Предлагаемую методику можно использовать для исследования процесса гидромеханического выдавливания труднообрабатываемых металлических материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено моделирование процесса гидромеханического выдавливания алюминиевого сплава. Установлено, что для реализации исследуемого процесса минимально необходимое давление на боковую поверхность заготовки должно быть рав-

но 100 МПа. Выявлено, что на удельное напряжение выдавливания наиболее существенное влияние оказывает коэффициент вытяжки, следующее по значимости — боковое давление, а коэффициент трения большой роли не играет. С использованием системы компьютерной математики MATLAB проведен регрессионный анализ результатов вычислительного эксперимента, определены коэффициенты в уравнениях регрессии. По результатам моделирования выявлены оптимальные параметры процесса гидромеханического выдавливания по критерию минимальной поврежденности деформируемого материала $\omega = 0,1789$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Уральский В.И., Плахотин В.С., Шефтель Н.И. Деформация металлов жидкостью высокого давления. М.: Металлургия, 1976.
2. Береснев Б.И., Гайворонский А.Т., Замараев В.К., Хаматов А.А. Гидропрессование. Екатеринбург: Изд-во ИПМ УрО РАН, 1998.
3. Колпашиников А.И., Вялов В.А. Гидропрессование металлов. М.: Металлургия, 1973.
4. Бывальцев С.В., Залазинский А.Г., Агапитова О.Ю. // Инж. журн. Справочник. 2012. № 12. С. 3—5.
5. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург: Изд-во УГТУ—УПИ, 2001.
6. Джонсон В., Кудо Х. Механика процесса выдавливания металла. М.: Металлургия, 1965.
7. Kato K., Murota T., Jimma T. // Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. 1968. Vol. 34, № 262. P. 1066.
8. Иванов К.М., Шевченко В.С., Юргенсон Э.Е. Метод конечных элементов в технологических задачах ОМД: Учеб. пос. СПб.: Инст-т машиностроения, 2000.
9. Колмогоров В.Л., Богатов А.А., Мигачев Б.А. и др. Пластичность и разрушение. М.: Металлургия, 1977.
10. Агапитова О.Ю., Бывальцев С.В., Залазинский А.Г. // Изв. вузов. Цв. металлургия. 2011. № 4. С. 50.
11. Пат. 129858 (РФ). Устройство для полунепрерывного гидромеханического прессования / А.Г. Залазинский, И.М. Березин, Г.Г. Залазинский, Т.Л. Щенникова. 2013.