

Экспериментальные исследования по пластической осадке между неподвижными стенками тонких полос в форме прямоугольника и сектора

д.ф.-м.н. проф. Кадымов В.А., д.т.н. проф. Сосенушкин Е.Н., к.ф.-м.н. Белов Н.А.
Университет машиностроения, МГТУ «Станкин», Институт Проблем Механики РАН
8(495)2230523; vkadymov@yandex.ru, 8(499)97330764; sen@stankin.ru,
8(495)4344151; belov@ipmnet.ru

Аннотация. В работе проводятся и анализируются эксперименты по осадке между сближающимися жесткими плитами тонкого пластического образца, ограниченного неподвижными стенками и первоначально имеющего форму прямоугольника или сектора в плане. Неподвижные стенки расположены вдоль длинных сторон прямоугольника и вдоль радиальных границ сектора. Выделены экспериментальные закономерности, которые позволяют корректно выбрать математическую модель для описания рассматриваемых течений.

Ключевые слова: Осадка тонкого пластического слоя, растекание, линия тока, деформация сдвига.

Краткий обзор современного состояния развития проблемы

Выделим один класс пластических течений в области формы сравнительно тонкого слоя, заключенного между двумя сближающимися поверхностями тел инструмента. Подавляющее большинство технологических процессов обработки давлением принадлежат к такому: штамповка и прессование тонкостенных элементов конструкций, тонколистовая прокатка и др. Это достаточно сложные пространственные нелинейные краевые задачи уравнений математической физики, в которых, с одной стороны, не определены в полной мере граничные условия, а с другой, сами границы тоже неизвестны и их необходимо найти из решения задачи. В указанных процессах развиваются большие контактные давления, на порядок превышающие сдвиговые характеристики материала пластического слоя, и в начальном приближении свойства материала оказываются близкими к свойствам идеальной жидкости.

Известно, что большие контактные давления вызывают нормальные упругие перемещения контактных поверхностей тел инструмента, соизмеримые с толщиной растекающегося слоя, и их учет может заметно сказаться на точности изготовления конечного тонколистового продукта. Так появилась задача о контактном взаимодействии пластического слоя с упругими внешними телами.

При обработке пористых материалов возникает необходимость учитывать объемную сжимаемость материала. В высокоскоростных процессах обработки давлением приходится учитывать силы инерции. В процессах горячей обработки, при которой происходит интенсивный теплообмен с внешними телами, появляются приконтактные слои затвердевания (эффект «холодной» сварки), существенно усложняющие моделирование процесса.

В теории обработки давлением общепринято считать, что свойства материала пластического слоя удовлетворительно описываются уравнениями пластичности для траекторий малой кривизны. В середине прошлого столетия для описания указанного класса задач обработки давлением А.А.Ильюшин предложил эффективную двумерную, осредненную по толщине слоя математическую теорию течения в тонком пластическом слое [1,2,3], к которой приводит исходная трехмерная задача течения идеально пластического тела. Переход к двумерной, плоской в плане, задаче проводился на основе специальных гипотез, предложенных в результате анализа известного решения Прандтля в задаче об осадке плоского в вертикальном разрезе слоя пластического материала [1,4,5]. На контактных поверхностях принимается условие полного проскальзывания материала, а касательные напряжения достигают максимального значения, равного пределу текучести материала слоя на сдвиг [6]. В рамках этой модели А.А.Ильюшин сформулировал краевую задачу для вязкой жидкости в области с подвижной границей относительно трех (осредненных по толщине слоя) неизвестных функций: контактного давления и двух компонент скорости течения. Он же указал на возможность упрощения постановки до модели «идеальной» жидкости. Все последующие исследо-

ватели в своих работах ограничились этой упрощенной постановкой. Были предложены метод аналогий с песчаной насыпью [2], метод Лежандра в решении статической задачи относительно контактного давления [7], вариационные методы [8], основанные на методе характеристик численно-аналитические решения практических задач [9]. Теория течения в тонком пластическом слое (ТТПС) была развита на горячие процессы [3]. В работах [10,11] исследована кинематика процесса растекания пластического слоя, выведено дифференциальное уравнение параболического типа для определения плоского в плане контура области, занятой растекающимся пластическим слоем. В [11] представлены классы решений подобия этого уравнения. В [12] получены другие формы представления эволюционного уравнения растекания пластического слоя; установлено, что уравнение растекания пластического слоя является частным случаем нелинейного уравнения теплопроводности [13], а следовательно, для задач растекания пластических слоев справедливы все известные точные решения, выписанные в [13]. В [14] представлены автомодельные решения для эволюционного уравнения. Следует предостеречь от неверных толкований: не все полученные точные аналитические решения нелинейного уравнения теплопроводности можно принять в качестве решения задач растекания пластических слоев - необходимо установить физичность каждого конкретного решения. Отметим еще и другие имеющиеся подходы и точные решения для эволюционного уравнения растекания [15,16].

ТТПС получила развитие на случай течения по упруго-деформируемым поверхностям [4]. В предположении винклеровской модели упругого основания для внешних тел дан метод решения указанных задач и получены точные решения [17].

В дальнейшем эта теория получила обоснование на случай течения по поверхностям с ярко выраженной фактурой (анизотропия свойств сил трения на контакте) [18,19] для высокоскоростных процессов [20], для процессов пластической обработки материалов, обладающих как свойствами со структурной зависимостью (порошковые, спеченные материалы), так и объемно сжимаемых [21].

Отметим также другой подход [22] в описании процессов течения пластических слоев, приводящий к несколько иной задаче.

Эксперименты по осадке тонкого пластического слоя

В [23] рассматриваются такие течения пластического слоя, которые невозможно описать в рамках модели «идеальной жидкости», и, в частности, растекание слоя, составленного из разных сред. Для их корректного описания надо использовать более общую модель «вязкой жидкости».

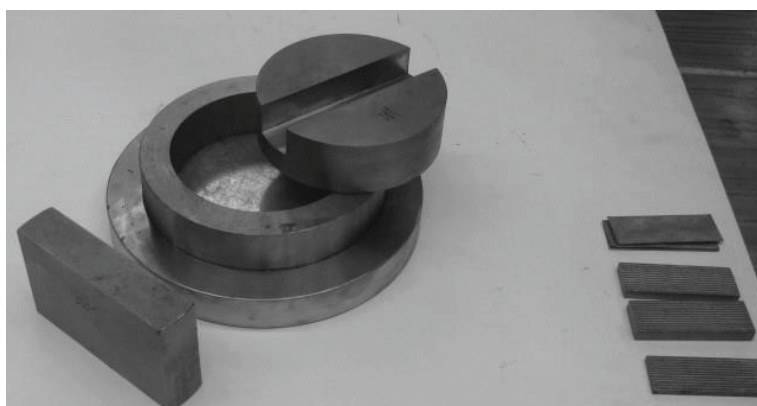


Рисунок 1. Оснастка, предназначенная для проведения экспериментов по пластической осадке тонкой полосы

С целью выяснения влияния касательных напряжений (осредненных по толщине слоя) на кинематику течения и, в особенности, вблизи неподвижных границ, были проведены следующие эксперименты:

- 1) пластическая осадка слоя прямоугольной формы в плане между неподвижными (по ширине прямоугольника) границами;
- 2) пластическая осадка слоя формы сектора в плане между неподвижными радиальными

ми границами.

Остановимся сначала на первом эксперименте. Была сконструирована и изготовлена специальная штамповая оснастка (рисунок 1), подготовлены начальные образцы полос из свинца следующих размеров: длиной $2l_0 = 70$ мм, шириной $2b_0 = 25$ мм, и толщиной $h_0 = 4$ мм (рисунок 2).

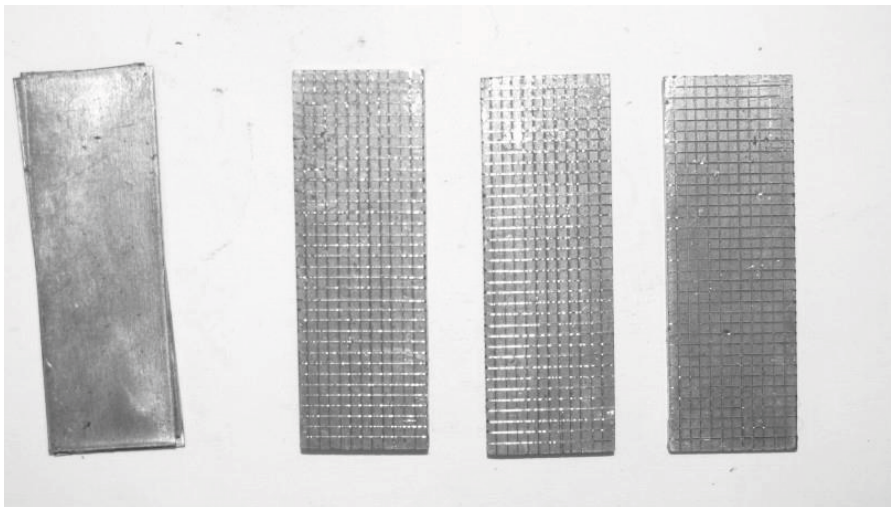
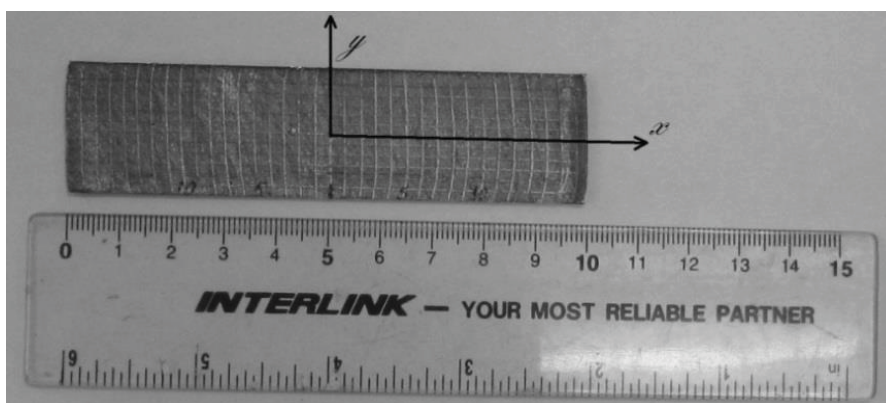


Рисунок 2. Начальные образцы свинцовых полос с нанесенной координатной сеткой ($2l_0 = 70$ мм; $2b_0 = 25$ мм; $h_0 = 4$ мм)



а)



б)

Рисунок 3. Полоса после деформации ($\Delta h/h_0 = 0.3$): а-система координат; б- сетка с 4-ех кратным увеличением

Находили абсолютную $\Delta u = u_m(X) - u_b(X)$ и относительную $\Delta u(X)/u_m(X)$ величины перемещения в сечении $X = const$ (таблица 1, 2).

Таблица 1

$h_1 = 2.8 \text{ мм}; \Delta h_1 = h_0 - h_1 = 1.2 \text{ мм}; F = 200 \text{ кН}$.

X	$u_m(X)$	$u_b(X)$	$\Delta u(X) = u_m - u_b$	$\Delta u(X)/u_m(X)$
0	0	0		
4	2.43	1.92	0.52	0.21
8	3.93	3.29	0.64	0.16
12	6.16	4.95	1.21	0.19
16	8.10	6.68	1.42	0.17
20	9.93	8.07	1.86	0.19
24	11.90	9.54	2.36	0.20
28	14.05	10.60	2.45	0.24
32	16.05	11.51	4.64	0.28

Таблица 2

$h_2 = 2.6 \text{ мм}; \Delta h_2 = h_0 - h_2 = 1.4 \text{ мм}; F = 310 \text{ кН}$.

X	$u_m(X)$	$u_b(X)$	$\Delta u(X) = u_m - u_b$	$\Delta u(X)/u_m(X)$
0	0	0		
4	3.05	2.64	0.41	0.13
8	5.40	3.92	1.48	0.28
12	7.98	6.08	1.90	0.24
16	8.38	7.03	1.35	0.16
20	12.27	10.34	1.93	0.16
24	14.35	12.04	2.31	0.16
28	16.94	14.06	2.88	0.17
32	19.12	17.45	2.54	0.13

Анализ экспериментальных результатов подтверждает заметное отставание продольного перемещения частиц вблизи неподвижной границы: вертикальные в начальном состоянии риски ($X = const$) перестают быть вертикальными в процессе осадки полосы. Можно показать, что полученные экспериментальные закономерности невозможно описать с помощью модели «идеальной жидкости», в которой пренебрегают касательными напряжениями. Действительно, указанная задача в модели «идеальной» жидкости описывается уравнениями [1]:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{2\tau_s}{h} \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}}; \frac{\partial p}{\partial y} = -\frac{2\tau_s}{h} \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}}; \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{d\lambda}{dt} = 0, \left(\lambda(t) = \ln \frac{h_0}{h(t)} \right)$$

с краевыми условиями

$$y = 0 : v = 0; y = b_0 : v = 0; x = 0 : u = 0;$$

а на свободной границе

$$p = \sigma_s,$$

где p, u, v - осредненные по толщине слоя контактное давление и компоненты скорости течения.

Ее решение имеет вид:

$$v \equiv 0; u = -\frac{1}{h} \frac{dh}{dt} x; p = -\frac{2\tau_s}{h} \left(x - \frac{h_0 l_0}{h} \right) + \sigma_s,$$

и оно не согласуется с экспериментальными данными, т.к. в теории получено одномерное течение, а в эксперименте мы имеем двумерное течение (искривление сетки).

Для проведения второй серии экспериментов, по аналогии с первой, были изготовлены штамповая оснастка (рисунок 4) и пара свинцовых пластин формы сектора в плане ($R_0 = 45 \text{ мм}; h_0 = 4 \text{ мм}; \varphi_0 = 45^\circ$) (рисунок 5).

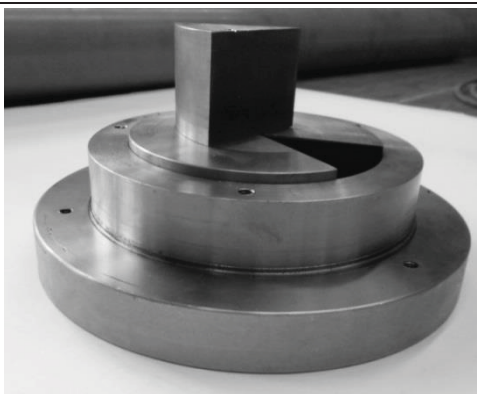


Рисунок 4. Оснастка, предназначенная для проведения эксперимента по пластической осадке тонкой полосы формы сектора в плане

Пластина, расположенная в канале оснастки, осаживалась так, что центральный угол оставался неизменным. Координатная сетка в виде концентрических дуг окружностей наносилась на одну из внутренних поверхностей. Проводились измерения минимального значения перемещения $u_b(R) = u(R; \varphi = 22.5^\circ)$ вблизи неподвижной границы ($\varphi = 22.5^\circ$) и максимального значения $u_m(R) = u(R, \varphi = 0)$ в средней по ширине точке ($Y = 0$) (рисунок 5).

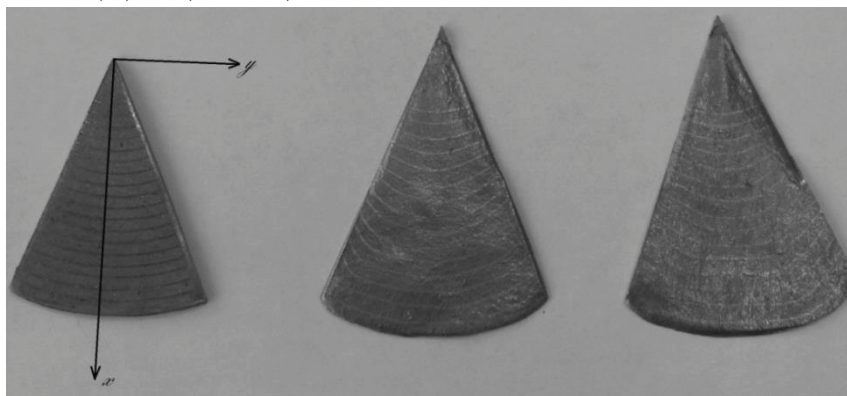


Рисунок 5. Образец в начальном и деформированном состоянии

$$R_0 = 45 \text{ мм}; h_0 = 4 \text{ мм}; \varphi_0 = 45^\circ; \Delta h / h_0 = 0.42$$

Определяли абсолютную $\Delta u(R) = u_m - u_b$ и относительную $\Delta u / u_m$ величины отклонения перемещения в сечении $R = \text{const}$ (таблица 3).

Таблица 3

$$h_1 = 2.32 \text{ мм}; \Delta h_1 = h_0 - h_1 = 1.68 \text{ мм}; F = 164 \text{ кН}.$$

R	$u_m(R)$	$u_b(R)$	$\Delta u(R) = u_m - u_b$	$\Delta u / u_m$
16.42	0	0.08	-	-
18.53	0.27	0	0.27	-
20.59	0.91	0.15	0.76	0.83
22.35	1.53	0.25	1.28	0.83
24.52	2.58	0.51	2.07	0.80
26.63	3.30	0.65	2.65	0.80
28.50	3.89	1.18	2.70	0.70
30.65	4.71	2.41	2.30	0.49
32.28	5.76	1.93	3.83	0.66
34.53	5.50	2.19	3.31	0.60
36.29	6.50	2.76	3.74	0.57
38.41	6.82	2.73	4.09	0.60
40.41	7.71	4.18	3.53	0.45
42.36	8.41	5.08	3.33	0.39

Анализ результатов эксперимента во второй серии опытов также подтверждает заметное отставание продольного перемещения частиц вблизи неподвижной границы: окруж-

ные в начальном состоянии риски ($R = const$) перестают быть дугами окружностей в процессе осадки. Полученные экспериментальные закономерности невозможно описать с помощью модели «идеальной жидкости». Действительно, представленная задача в модели «идеальной жидкости» описывается следующими уравнениями в полярной системе координат

$$\frac{\partial p}{\partial r} = -\frac{2\tau_s}{h} \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}}; \frac{\partial p}{r \partial \varphi} = -\frac{2\tau_s}{h} \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}}; \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial v}{r \partial \varphi} - \frac{d\lambda}{dt} = 0$$

с краевыми условиями

$$\varphi = 0: v = 0; \varphi = b_0: v = 0;$$

а на свободной границе

$$p = \sigma_s.$$

Ее решение имеет вид:

$$v \equiv 0; u = -\frac{1}{h} \frac{dh}{dt} \frac{r}{2}; p = -\frac{2\tau_s}{h} \left(r - R_0 \sqrt{\frac{h_0}{h}} \right) + \sigma_s.$$

Согласно этому решению, первоначально окружные риски остаются окружностями в процессе течения, что не согласуется с экспериментальными данными.

По-видимому, полученные экспериментальные результаты (искривление сетки вблизи неподвижной границы) можно корректно описать с помощью модели «вязкой жидкости», чему будет посвящено отдельное исследование.

Выводы

В работе представлен анализ результатов специальных экспериментов по осадке тонкого пластического слоя между сближающимися жесткими шероховатыми плитами, занимающего в плане область формы прямоугольника и сектора с неподвижными стенками. Неподвижные стенки расположены вдоль длинных сторон прямоугольника и вдоль радиальных границ сектора.

Растекание образца происходит ожидаемо: по прямым линиям тока, параллельным длинной стороне прямоугольника, или по лучам сектора. При этом установлено, что продольные перемещения вблизи неподвижных стенок заметно отстают от перемещений вдали от границы, а максимальные перемещения наблюдаются на линии симметрии образца относительно неподвижных стенок. Этот факт говорит о наличии ненулевых сдвиговых напряжений и (скоростей) деформаций в рассматриваемых течениях тонкого пластического слоя.

Для теоретического описания подобных течений А. А. Ильюшиным еще в прошлом веке была предложена модель, полученная осреднением по толщине пластического слоя, которую условно можно назвать моделью «вязкой жидкости». Однако более популярной стала упрощенная модель «идеальной жидкости», в которой пренебрегают сдвиговыми напряжениями и скоростями деформаций. Представленные эксперименты показывают, что корректное описание рассматриваемых течений возможно только в рамках более общей модели «вязкой жидкости».

Литература

1. Ильюшин А.А. Вопросы теории течения пластического вещества по поверхностям // ПММ. 1954. т.18. №3. с.265-288.
2. Ильюшин А.А. Полная пластичность в процессах течения между жесткими поверхностями, аналогия с песчаной насыпью и некоторые приложения // ПММ. 1955.т. 19. Вып. 6. с. 693–713.
3. Ильюшин А.А. Некоторые вопросы теории пластического течения. ПММ.1958, №2.-с.64-86.
4. Кийко И.А. Теория пластического течения // М.: МГУ. 1978. 75 с.
5. Ивлев Д.Д. и др. Предельное состояние деформируемых тел и горных пород// М.: Физматлит. 2008. 832с.
6. Унксов Е.П. Инженерные методы расчета усилий при обработке металлов давлением // М.: Машгиз. 1955. 280с.
7. Арутюнов Ю.С, Гонор А.Л. Осаживание тонких поковок произвольной формы в плане //

Изв.АН СССР. 1963. №1. с.166-171.

8. Кийко И.А. Вариационный принцип в задачах течения тонкого слоя пластического вещества // Докл. АН СССР. 1964. т. 157. № 3. с. 551–553.

9. Кадымов В.А. Некоторые задачи пластического течения в тонком слое металла // Канд. дисс., М.: МГУ. 1981. 108с.

10. Безухов В.Н. Об осадке пластического слоя некруговой формы в плане // Канд. дисс., М.: МГУ. 1955. 78с.

11. Кийко И.А. Пластическое течение металлов// В сб. «Научные основы прогрессивной техники и технологии». М.,1985.С.102-133.

12. 4. Белов Н.А., Кадымов В.А. О краевой задаче течения пластического слоя между сближающимися жесткими плитами // Изв.РАН.МТТ. 2011. №1. с.46-58.

13. Полянин А.Д., Зайцев В.Ф. Справочник по нелинейным уравнениям математической физики. Точные решения // М.: Физматлит. 2002. 432с.

14. Кадымов В.А. Автомодельные уравнения в задаче растекания пластического слоя на плоскости и их решения // Вестник ТулГУ. 2009. т.15. вып.2. с.38-44.

15. Кадымов В.А., Белов Н.А. О точных решениях уравнения растекания пластического слоя на плоскости // Тр. межд. научно-техн. конф. «Совр. метал. матер. и технол. (СММТ'2011)»,СПбГПУ. 2011. с.33-36.

16. Кийко И.А. О форме пластического слоя, сжимаемого параллельными плоскостями // ПММ. 2011. т. 75. вып.1. с.15-26.

17. Кадымов В.А., Быстриков С.К. Некоторые новые решения нестационарных задач растекания пластического слоя по деформируемым поверхностям // Изв. Тул.ГУ. 2006. т.11 . в.2. с.54-60.

18. Kadymov V. Mathematical modeling of contact problems of plastic flow // Nonlinear Anal.Theory &Appl. Gr.Br. 1997. v.S0. №8.

19. Кийко И.А.Анизотропия в процессах течения тонкого пластического слоя // ПММ, 2006. т.70. вып.2. с.344-351.

20. Кийко И.А., Кадымов В.А. Обобщения задачи Л.Прандтля о сжатии полосы // Вестн.Моск.Ун-та. Сер.1. 2003. №4. с.50-56.

21. Кийко И.А.Обобщение задачи Л.Прандтля о сжатии полосы на случай сжимаемого материала // Вестн.Моск.Ун-та. 2002, №4. с.47-52.

22.Мохель А.Н., Салганик Р.Л. Тонкий пластический слой с произвольным контуром, сжимаемый между жесткими плитами // ДАН СССР. 1987. т.293. №4. с.809-813.

23. Кадымов В.А., Белов Н.А. О растекании между сближающимися жесткими плитами пластического слоя, состоящего из разных сред // Матер.межд.научн.конф. «Совр. пробл. матем., мех. и инф-ки». Тула: ТулГУ. 2012. с.150-157

Расчет по мощности КГШП для техпроцессов термомеханической обработки

д.т.н. проф. Радкевич М.М., Фомин Д.Ю.

Санкт-Петербургский государственный политехнический ун-тет

+7 (812) 552-6623, +7 (812) 552-9302

Аннотация. Рассчитано усилие штамповки поковки удлиненной формы при различной температуре в открытом штампе по формуле М.В.Сторожева и произведено сравнение с усилием штамповки идентичной поковки в результате конечно-элементного моделирования. Предложены варианты корректировки формул.

Ключевые слова: штамповка, поковка, открытый штамп, усилие штамповки, конечно-элементное моделирование

Повысить эффективность технологических процессов термомеханической обработки возможно за счет рационализации температурных, временных, силовых схем деформацион-