

УДК 621.77

*С. А. АСТАПЧИК, Г. В. КОЖЕВНИКОВА*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛА ЗАГОТОВОК ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЙ ПРОКАТКИ**

*Физико-технический институт НАН Беларуси*

*(Поступила в редакцию 20.05.2014)*

Фундаментальные исследования и прикладные разработки в области поперечно-клиновой прокатки (ПКП) на протяжении ряда лет выполняются в научных центрах Беларуси, России, Германии, Испании, Польши, Чехии, Китая. При производстве поковок с удлиненной осью и валов ПКП обеспечивают высокий коэффициент использования металла, максимальное приближение прокатанной детали к профилю изделия, широкие технологические возможности, высокую стойкость инструмента, полную автоматизацию процесса.

Белорусская школа ПКП занимает одно из лидирующих мест в мире в этой области. Первые исследования ПКП были выполнены в Физико-техническом институте НАН Беларуси в 1969 г. В настоящее время в институте на высоком уровне разработаны теоретические и технологические основы ПКП. По оснащенности станами ПКП и по количеству ученых и специалистов в этой области Республика Беларусь, несомненно, занимает важнейшее место в мире. Учениками ФТИ НАН Беларуси созданы фирмы ЗАО «Белтехнология и М», ООО «Инженерный центр «АМТинжиниринг», НИЛ пластичности НИЧ БНТУ. Около 200 ед. оборудования для прокатки, созданных нами и нашими учениками, работают в 15 странах мира, в том числе в США, Республике Корея и др.

Это стало возможным благодаря тому, что в ФТИ НАН Беларуси создана классическая теория поперечной прокатки (ПП), исследованы напряженно-деформированное состояние металла в очаге деформации, условия устойчивого протекания процесса, впервые математически обосновано явление вскрытия осевой полости так называемого эффекта Маннесмана, получены математические модели, прогнозирующие качество прокатываемых изделий, в первую очередь, их точность. Разработаны и исследованы компьютерные модели ПКП на базе пакета программ LS-DYNA, определена достоверность параметров процесса, рассчитанных при помощи компьютерных моделей.

Мониторинг современного производства методом ПКП поковок с удлиненной осью и валов на предприятиях Республики Беларусь [1] выявил, что в настоящее время 36% заготовок изготовлено из стали 20Х, 40Х, 35% – из стали 20, 35, 45, 17% – из стали 18ХГТ, 25ХГТ, 10% – из стали 35ХГСА и 2% – из стали 20ХНР, 20ХНЗА. Таким образом, в настоящее время метод ПКП применяется для сталей с высокой пластичностью. Все перечисленные стали, как правило, прокатываются в области горячих температур 1373–1523 К, где их пластичность настолько высокая, что может быть обеспечена обработка без вскрытия осевой полости. По причине высокой вероятности вскрытия осевой полости теплая прокатка указанных сталей при температурах 973–1173 К применяется редко, в то же время снижение температуры нагрева указанных материалов обеспечивает существенное снижение энергозатрат (до 34%).

По отношению к ПКП металлы и сплавы можно разделить на три качественные группы:

- 1) высокопластичные металлы, вероятность вскрытия полости которых при ПКП незначительна;
- 2) металлы с ограниченной пластичностью, при прокатке которых существует вероятность осевого разрушения, однако путем оптимизации параметров прокатки возможно обеспечивать протекание процесса без разрушения;

3) металлы с низкой пластичностью, ПКП без разрушения которых невозможна при любых параметрах процесса.

Наши исследования показали, что область материалов с ограниченной пластичностью может быть определена количественно: предельная степень деформации сдвига в ней лежит в пределах от 1,5 до 5,0 при напряжениях, реализуемых на оси заготовки, т. е. среднее напряжение  $\sigma/K$  в пределах от 0 до 0,7 и третий инвариант девиатора напряжений  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$  от  $-1,0$  до  $-0,45$ . Если предельная степень деформации сдвига при указанном напряженном состоянии выше 5,0, то это высокопластичный материал, если ниже 1,5, то это материал с низкой пластичностью. К материалам с ограниченной пластичностью можно отнести конструкционные стали в области теплых температур прокатки 973–1173 К, высоколегированные, жаропрочные, нержавеющие, инструментальные стали в области горячих температур прокатки 1173–1532 К, а также сплавы на основе никеля, алюминия, меди и некоторые марки титана.

Дальнейшее развитие ПКП будет осуществляться путем освоения прокатки металлов и сплавов с ограниченной пластичностью. В настоящий момент это малоизученная область применения процесса, отличающаяся от традиционной области более высокими требованиями к оптимальному использованию ресурса пластичности металлов. При разработке таких процессов технологи сталкиваются с проблемой резкого снижения пластичности металла на оси заготовки, стабильность протекания процесса нарушается вскрытием осевой полости и проскальзыванием заготовки по инструменту. Область на оси заготовки при ПКП является самой проблемной зоной, так как здесь накапливаются значительные деформации и реализуется неблагоприятная схема напряженного состояния: гидростатическое давление растягивающее, параметр третьего инварианта девиатора напряжений отрицательный – наихудшие условия для пластичности металла [2].

В общем случае, в том числе и для немонотонных деформаций, мерой пластичности материала может служить степень деформации сдвига [3]

$$\Lambda = \int_0^t H dt, \quad (1)$$

где  $H$  – интенсивность скоростей деформации сдвига,  $c^{-1}$ ;  $t$  – время, с;

$$H = +\sqrt{\frac{2}{3}[(\xi_X - \xi_Y)^2 + (\xi_Y - \xi_Z)^2 + (\xi_Z - \xi_X)^2] + \eta_{XY}^2 + \eta_{YZ}^2 + \eta_{ZX}^2}, \quad (2)$$

где  $\xi_X, \xi_Y, \xi_Z, \eta_{XY}, \eta_{YZ}, \eta_{ZX}$  – компоненты тензора скорости деформации.

На степень деформации сдвига оказывают влияние температура и скорость деформации, напряженное состояние, нелинейность накопления деформации и ее немонотонность. Зависимость пластичности от температуры определяется экспериментально достаточно просто [2]. Как показали наши исследования [2], влиянием скорости деформации на пластичность в процессах ПКП можно пренебречь.

Согласно [4], в напряженном состоянии необходимо учитывать два взаимозависимых фактора: среднее напряжение  $\sigma/K$  и параметр третьего инварианта девиатора напряжений  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$ . Существующие методы определения пластичности позволяют определить ее в диапазонах, показанных на рис. 1, в то время как процесс ПКП, согласно нашим исследованиям, протекает в других диапазонах. Указанная проблема имеет два решения: 1) разработка новых методов испытания пластичности в требуемом диапазоне; 2) экстраполяция известных данных на исследуемый диапазон напряжений.

ПКП – процесс с ярко выраженной немонотонностью, в этой связи пластичность материала должна определяться с учетом показателя роста пластичности при немонотонном деформировании  $\Omega$ :

$$\Lambda_{\text{пр}}^* = \Lambda_{\text{ц}} N_{\text{пр}} = (\Lambda_{\text{пр}})^\Omega, \quad (3)$$

где  $\Lambda_{\text{пр}}^*$  – предельная степень деформации сдвига при немонотонном деформировании;  $\Lambda_{\text{пр}}$  – предельная степень деформации сдвига при монотонном деформировании;  $\Lambda_{\text{ц}}$  – степень деформации

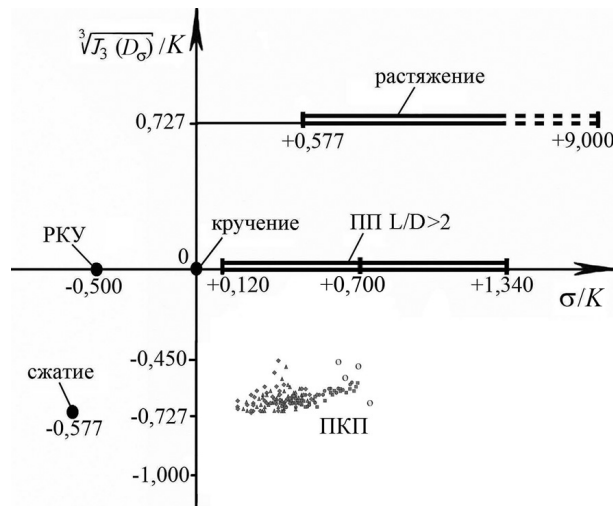


Рис. 1. Области экспериментального определения пластических свойств металлов и напряженного состояния на оси заготовки при ПКП на стационарной стадии процесса

сдвига за один цикл нагружения;  $N_{пр}$  – количество циклов нагружения до разрушения;  $\Omega > 1$  – показатель роста пластичности при немономном деформировании.

Экспериментальным методом ПП дисковидного образца находится ресурс пластичности исследуемого образца после ПКП

$$\lambda^* = 1 - \frac{\Lambda^*}{\Lambda_{пр}^*}, \quad (4)$$

где  $\lambda^*$  – ресурс пластичности при немономном деформировании;  $\Lambda^*$  – степень деформации сдвига при немономном деформировании.

Из уравнения (4) находится предельная степень деформации сдвига при немономном деформировании

$$\Lambda_{пр}^* = \frac{\Lambda^*}{1 - \lambda^*}. \quad (5)$$

В результате неизвестными остаются два взаимозависимых параметра – показатель роста пластичности при немономном деформировании  $\Omega$  и предельная степень деформации сдвига  $\Lambda_{пр}$ .

С учетом того, что кинематики и динамики ПКП и ПП близки между собой, логично применить допущение, что зависимость параметра  $\Omega$  от среднего напряжения в обоих случаях идентична. Также допустим, что параметр  $\Omega$  независим от параметра третьего инварианта девиатора напряжений  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$ , тогда, используя экспериментальные данные по ПП образцов, определим, что параметр  $\Omega$  для стали 40X может быть представлен в следующем виде:

$$\begin{aligned} \text{при } 1270 \text{ К } \Omega &= 0,792 + 2,69 (\sigma/K); \\ \text{при } 1370 \text{ К } \Omega &= 1,522 + 1,44 (\sigma/K); \\ \text{при } 1470 \text{ К } \Omega &= 1,732 + 1,09 (\sigma/K). \end{aligned} \quad (6)$$

Предельная степень деформации сдвига может быть определена таким образом:

$$\Lambda_{пр} = (\Lambda_{пр}^*)^{\frac{1}{\Omega}}. \quad (7)$$

Эксперимент для подтверждения рассматриваемой деформационной теории пластического разрушения строился следующим образом. Заготовки из стали 40X нагревались токами высокой частоты и прокатывались при 1170, 1270 и 1370 К на клиновых инструментах с параметрами: угол заострения клинового инструмента  $\beta = 9^\circ$ , угол наклона боковой грани клинового инструмента  $\alpha = 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$  со степенями обжатия  $\delta = 1,25$  и  $1,66$ .



Рис. 2. Дисковидные образцы в исходном состоянии (а) и после ПП до вскрытия осевой полости (б)

Из частей прокатанной заготовки, соответствующих стационарной стадии прокатки, вырезались первичные дисковидные образцы (рис. 2). Аналогичные вторичные образцы вырезались из непрокатанных частей тех же заготовок, чтобы условия нагрева и охлаждения у них были идентичными первым образцам. Затем первичные и вторичные образцы при комнатной температуре прокатывались методом ПП в закрытых калибрах с одинаковым и постоянным обжатием до вскрытия осевой полости и по предельному количеству циклов нагружения определяли ресурс пластичности первичных образцов при немонотонной деформации:

$$\lambda^* = \frac{N_{\text{пр1}}}{N_{\text{пр2}}}, \quad (8)$$

где  $N_{\text{пр1}}$ ,  $N_{\text{пр2}}$  – предельное количество циклов нагружения до вскрытия осевой полости соответственно первичных и вторичных образцов.

На некоторых образцах вскрытие полости при ПКП выявлялось визуально после вытачивания первичных образцов (рис. 3).

Результаты экспериментального определения ресурса пластичности стали 40X показаны в табл. 1.

Компьютерным моделированием с использованием пакета программ определялись среднее напряжение  $\sigma/K$ , параметр третьего инварианта девиатора напряжений  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$  и степень деформации сдвига  $\Lambda^*$  вдоль траектории движения материальной частицы металла при движении в очаге деформации вдоль оси заготовки. Значения  $\sigma/K$  и  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$  усреднялись как вдоль траектории движения, так и при различных температурах, результаты представлены в табл. 2. Влияние температуры нагрева заготовок на указанные параметры незначительное и в дальнейшем в расчет не принималось. Отметим установленные закономерности: увеличение угла наклона боковой грани клинового инструмента  $\alpha$  сопровождается уменьшением среднего напря-

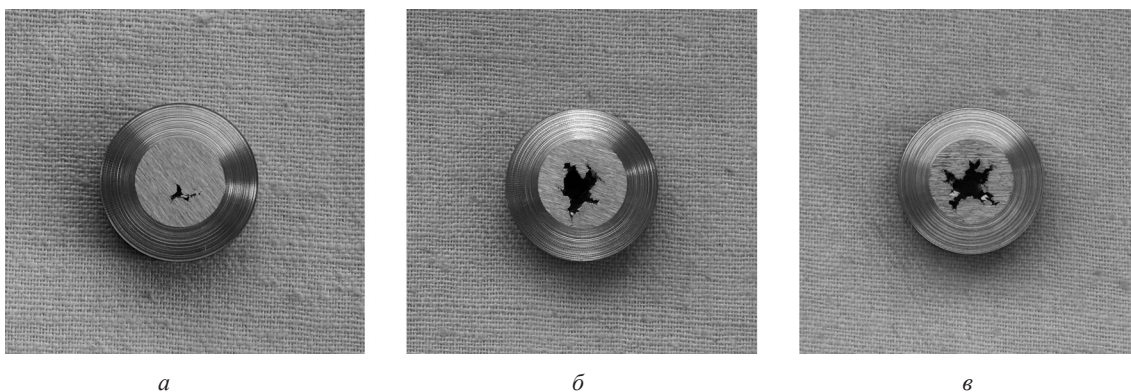


Рис. 3. Вскрытие полости при ПКП на первичных образцах (сталь 40X):  
 а –  $\alpha = 30^\circ$ ;  $\delta = 1,25$ ;  $T = 1170$  К; б –  $\alpha = 20^\circ$ ;  $\delta = 1,25$ ;  $T = 1270$  К; в –  $\alpha = 20^\circ$ ;  $\delta = 1,25$ ;  $T = 1170$  К

Т а б л и ц а 1. Ресурс пластичности при немономном деформировании  $\lambda^*$  стали 40X ( $\beta = 9^\circ$ )

$\delta$	T, K	$\alpha, ^\circ$		
		20	30	40
1,25	1173	Полость	Полость	0,20
	1273	Полость	0,10	0,50
	1373	0,54	0,84	0,93
1,66	1173	0,17	0,70	0,82
	1273	0,48	0,84	0,90
	1373	0,74	0,82	0,98

жения  $\sigma/K$  и снижением параметра третьего инварианта девиатора напряжений  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$ , а также степени деформации сдвига  $\Lambda^*$  при немономном деформировании. Увеличение степени обжатия  $\delta$  приводит к уменьшению среднего напряжения  $\sigma/K$ , снижению степени деформации сдвига  $\Lambda^*$  при немономном деформировании и практически не отражается на параметре третьего инварианта девиатора напряжений.

Т а б л и ц а 2. Напряженно-деформированное состояние при ПКП стали 40X в диапазоне температур 1170–1370 K

Параметр	$\delta = 1,25$			$\delta = 1,66$		
	20	30	40	20	30	40
$\alpha, ^\circ$						
$\sigma/K$	0,47	0,40	0,32	0,26	0,18	0,10
$\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$	-0,59	-0,62	-0,65	-0,60	-0,62	-0,65
$\Lambda^*$	1,05	0,70	0,48	3,56	2,17	1,53

Подставим значение (5) в формулу (7) и получим

$$\Lambda_{\text{пр}} = \left( \frac{\Lambda^*}{1 - \lambda^*} \right)^{\frac{1}{\Omega}}. \quad (9)$$

Используя экспериментальные данные (табл. 1) и результаты компьютерного моделирования (табл. 2), можно определить значение предельной степени деформации сдвига  $\Lambda_{\text{пр}}$  стали 40X для различных параметров ПКП (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Предельная степень деформации сдвига  $\Lambda_{\text{пр}}$  стали 40X

$\sigma/K$	0,47	0,40	0,32	0,26	0,18	0,10
$\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$	-0,59	-0,62	-0,65	-0,60	-0,62	-0,65
$\Lambda_{\text{пр}}$ при T = 1170K	0,28*	0,49*	0,60	3,30	7,00	8,50
$\Lambda_{\text{пр}}$ при T = 1270K	0,38*	0,78	0,96	3,73	7,66	13,04
$\Lambda_{\text{пр}}$ при T = 1370K	2,28	4,38	6,86	3,96	9,39	14,30

\* Значения получены экстраполяцией данных при иных средних напряжениях, так как величину  $\lambda^*$  в этих экспериментах невозможно определить.

Зависимость предельной степени деформации сдвига  $\Lambda_{\text{пр}}$  от двух параметров напряженного состояния – среднего напряжения  $\sigma/K$  и параметра третьего инварианта девиатора напряжений  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$  при температуре 1370 K – показана на рис. 4. Данная зависимость в диапазонах среднего напряжения может быть описана следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \sigma/K = 0,10-0,26: \Lambda_{\text{пр}} &= \frac{22,63}{25,82(\sigma/K) - 1}, \\ \sigma/K = 0,32-0,47: \Lambda_{\text{пр}} &= \frac{2,09}{4,08(\sigma/K) - 1}. \end{aligned} \quad (10)$$

Это позволяет прогнозировать значение  $\Lambda_{\text{пр}} = 3,12$  при среднем напряжении  $\sigma/K = 0,32$  и параметре третьего инварианта девиатора напряжений  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K = -0,58$ . Данный расчет позволяет

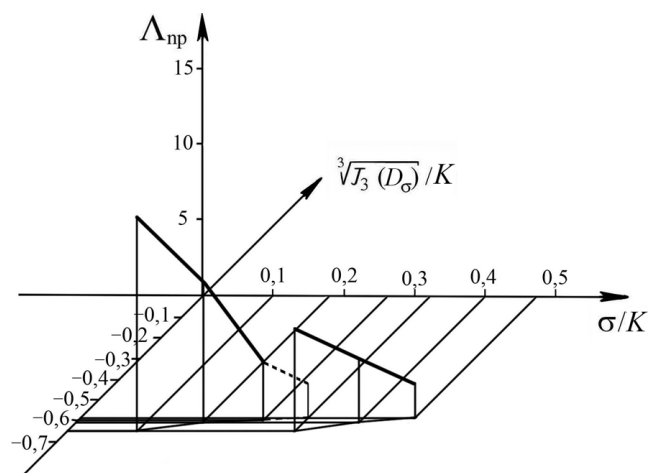


Рис. 4. Зависимость предельной степени деформации сдвига  $\Lambda_{пр}$  стали 40X при 1370 К

судить о влиянии параметра  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$  на пластичные свойства стали 40X: уменьшение со значения  $-0,58$  до величины  $-0,65$  вызывает рост  $\Lambda_{пр}$  в 2,2 раза.

Проведенные исследования позволяют определить ресурс пластичности  $\lambda^*$  при тех параметрах ПКП, при которых наблюдалось вскрытие осевой полости. В результате расчеты с использованием деформационной теории разрушения при пластическом течении позволяют со 100%-ной вероятностью не только предсказывать факт вскрытия полости при ПКП, но и количественно оценивать, насколько превышен порог, определяющий разрушение.

Таким образом, отличие прокатки традиционных заготовок и заготовок из материалов с ограниченной пластичностью состоит в расходовании пластических свойств металлов. Технология ПКП таких заготовок требует минимального использования ресурса пластичности в их осевой области. Для этого при разработке технологического процесса ПКП величины степени деформации сдвига при немономонном деформировании, параметра третьего инварианта тензора напряжений и среднего напряжения в данной области следует назначать минимально возможными, показатель роста пластичности при немономонном деформировании по возможности должен быть максимально большим.

## Литература

1. Кожевникова Г. В. // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. материалов. В 3 кн. Кн. 3. Обработка металлов давлением / Редколлегия: С. А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. Мн., 2013. С. 96–104.
2. Кожевникова Г. В. Теория и практика поперечно-клиновой прокатки, Мн., 2010.
3. Макушок Е. М., Матусевич А. С., Северденко В. П., Сегал В. М. Теоретические основыковки и горячей объемной штамповки. Мн., 1968.
4. Кожевникова Г. В. // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2010. № 2. С. 61–68.

S. A. ASTAPCHIK, G. V. KOZHEVNIKOVA

## A STUDY OF METAL PLASTICITY OF BILLETS PROCESSED BY CROSS-WEDGE ROLLING

### Summary

Metal plasticity as applied to non-monotonic cross-wedge rolling has been studied. A domain of plastic properties of billets with contained plasticity has been determined. It has been shown that the technology of cross-wedge rolling for such billets must be developed considering minimal utilization of the plasticity margin in the axial area of billets. There has been plotted the critical degree of the shear strain against the two parameters of the strain state – the mean stress and the third invariant of the stress deviator for a steel 40X billet at a temperature of 1370 K.