

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА
MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS

УДК 621.77
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-2-175-181>

Поступила в редакцию 26.06.2018
Received 26.06.2018

Г. В. Кожевникова

Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ПРИ ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЙ ПРОКАТКЕ ОДНИМ ИНСТРУМЕНТОМ**

Аннотация. Особенность поперечно-клиновой прокатки одним инструментом заключается в том, что заготовка деформируется одним инструментом и не поддерживается инструментом с противоположной стороны. За пределами контакта заготовки с инструментом по обе стороны инструмента заготовка фиксируется парами верхних и нижних плашек, посредством которых ось заготовки удерживается в постоянном положении. Такие условия прокатки качественно изменяют очаг деформации и, как следствие, напряженно-деформированное состояние.

Качественно оценено изменение напряженно-деформированного состояния путем сравнения полей линий скольжения при традиционной поперечной прокатке двумя инструментами и поперечной прокатке одним инструментом. В отличие от поперечной прокатки двумя инструментами, поперечная прокатка одним инструментом увеличивает на контакте нормальное и среднее напряжение на 7,8–14,5 %, изменяет среднее напряжение в осевой области образца с растягивающего на сжимающее. Это обстоятельство значительно увеличивает ресурс пластичности и позволяет прокатывать металлы с ограниченной пластичностью без вскрытия осевой полости. Методом компьютерного моделирования проведены сравнительные исследования влияния схемы поперечно-клиновой прокатки традиционного процесса и одним инструментом на напряженно-деформированное состояние в осевой области заготовки.

Ключевые слова: пластическое деформирование, поперечно-клиновая прокатка, напряженно-деформированное состояние, линии скольжения, пластичность, накопленные деформации

Для цитирования: Кожевникова, Г. В. Исследование напряженно-деформированного состояния при поперечно-клиновой прокатке одним инструментом / Г. В. Кожевникова // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2019. – Т. 64, №2. – С. 175–181. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-2-175-181>

G. V. Kozhevnikova

Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

STUDY OF STRESS-STRAIN STATE DURING CROSS-WEDGE ROLLING WITH ONE TOOL

Abstract. The peculiarity of cross-wedge rolling with one tool is the workpiece deformation with one tool and the fact that the workpiece is not supported with the tool from the opposite side. On both sides of the tool outside the contact with the workpiece, the workpiece is fixed with pairs of upper and lower tools, by means of which the axis of the workpiece is held in a constant position. Such conditions of rolling qualitatively change the deformation zone and, as a result, the stress-strain state.

The change in the stress-strain state was qualitatively estimated by comparing the fields of slip lines in the traditional two-tools cross rolling and one-tool cross rolling. One-tool cross rolling increases the normal and average stress at the contact by 7.8–14.5 %, changes the average stress of the specimen from tensile to compressive one in the axial region. This circumstance significantly increases the resource of plasticity and allows rolling metals with limited plasticity without opening the axial cavity. Comparative studies of the stress-strain state from the traditional two-tools cross-wedge rolling and one-tool cross-wedge rolling in the axial region of the workpiece have been carried out by computer simulation.

Keywords: plastic straining, cross-wedge rolling, stress-strain state, slip lines, plasticity, degree of shear strain

For citation: Kozhevnikova G. V. Study of stress-strain state during cross-wedge rolling with one tool. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 2, pp. 175–181 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-2-175-181>

Введение. Поперечно-клиноватая прокатка (ПКП) – один из наиболее экономичных способов изготовления давлением осесимметричных деталей при крупносерийном и массовом производстве. Она сочетает в себе рациональное использование материала, высокую производительность, максимальное приближение прокатанной детали к профилю изделия, высокую для процессов обработки давлением точность изделий, широкие технологические возможности, высокую стойкость инструмента, возможность полной автоматизации процесса [1–3].

Данный процесс применяется при производстве валов, осей, штифтов, пальцев для автомобилей, тракторов, самолетов, приборов, бытовой техники, железной дороги, инструментов, в том числе для горных и дорожных работ, сельхозтехники и др. Прокатка конструкционных сталей, ряда пластичных сплавов на основе меди, никеля, алюминия и циркония осуществляется без осложнений. Диапазон размеров деталей обеспечивает потребности промышленности: диаметры от 1 до 190 мм, длины от 20 до 1000 мм [4, 5]. Процесс ПКП может также эффективно использоваться для создания винтовых поверхностей, шаров [6] или сочетаться со штамповкой при изготовлении поковок с удлиненной осью (например, шатунов автомобильных двигателей, вилок кардана).

Коэффициент использования металла при ПКП достаточно высокий для процессов обработки давлением и находится в диапазоне от 0,8 до 0,98. Значение 0,98 достигается редко, это происходит, когда прокатанная деталь допускает утяжины на торцах и процесс ведется без обрезки концевых отходов. Часто процесс ПКП применяется в сочетании со штамповкой, которая осуществляется как до прокатки, так и после нее [7]. В этих случаях оба процесса проводят, как правило, одним нагревом. Таким образом производится штамповка лопаток авиационных двигателей, вилок кардана автомобиля, железнодорожных шурупов, гаечных ключей и других поковок с удлиненной осью. Точное дозирование заготовки при прокатке обеспечивает повышение стойкости инструмента при штамповке до 2 раз и в ряде случаев позволяет осуществить безоблойную штамповку.

ПКП стальных поковок подразделяют на горячую прокатку – нагрев до 1170–1470 К, теплую прокатку – нагрев до 870–1070 К, и холодную прокатку при 290 К. Нагрев до 1170–1470 К обеспечивает высокую пластичность прокатываемого материала и, как следствие, снижение усилий прокатки и вероятности вскрытия осевой полости внутри прокатываемой заготовки. Теплая прокатка снижает расход электроэнергии на нагрев, исключает образование окалины и обезуглероживание поверхности прокатываемой детали, улучшает чистоту поверхности до 0,6 Ra. При этом увеличиваются усилия прокатки, и для исключения осевой полости угол заострения клинового инструмента необходимо значительно уменьшать, что снижает производительность процесса [6]. Холодная ПКП имеет ограниченное применение и используется для высокопластичных металлов, таких как цирконий, или сплавов на основе меди и цинка.

Точность размеров прокатанных деталей зависит в основном от их габаритов и температуры нагрева. Для горячей прокатки точность размеров составляет $\pm 0,2$ мм на диаметре 30 мм и $\pm 0,5$ мм на длине 100 мм. Для теплой и холодной прокатки – $\pm 0,01$ мм на диаметре 7 мм и $\pm 0,1$ мм на длине 40 мм.

Вскрытие полости при ПКП. Одним из ограничений, налагаемых на ПКП, является разрушение металла в осевой области, так называемое вскрытие осевой полости. Согласно нашим исследованиям [1–3], причинами разрушения являются значительные накопления деформации (степень деформации сдвига Λ) и растягивающее напряжение в этой области. Напряженное состояние можно минимально описать двумя независимыми параметрами и третьим зависимым, определяемым условием пластичности. Нами предложено в качестве независимых параметров использовать среднее напряжение σ/K и параметр третьего инварианта девиатора напряжений $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$. В этом случае пластичность металла (при постоянной температуре и схеме деформирования) представляет собой поверхность $\Lambda = f(\sigma/K; \sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K)$ [4]. Количественная величина пластичности при деформации, оставшаяся до разрушения, названа ресурсом пластичности. Он определяется по формуле [8]

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

где λ^* – ресурс пластичности при немонотонном деформировании, Λ^* – степень деформации сдвига при немонотонном деформировании, $\Lambda_{пр}^*$ – предельная степень деформации сдвига при немонотонном деформировании.

Технология ПКП одним инструментом.

Традиционная ПКП не обеспечивает прокатку сталей ограниченной пластичности по причине вскрытия осевой полости. В этом случае возникает необходимость использования новых способов ПКП, в том числе одним инструментом (рис. 1).

Особенность этой ПКП заключается в том, что заготовка деформируется одним инструментом и не поддерживается инструментом с противоположной стороны. За пределами контакта заготовки с инструментом по обе стороны инструмента заготовка фиксируется парами верхних и нижних плашек, посредством которых ось заготовки удерживается в постоянном положении. Такие условия прокатки качественно изменяют очаг деформации (ОД) и, как следствие, напряженно-деформированное состояние.

Качественно оценить изменение напряженно-деформированного состояния возможно путем сравнения полей линий скольжения (ЛС) при традиционной поперечной прокатке (ПП) двумя инструментами или одним инструментом.

Решение задачи ПП двумя инструментами методом графического построения полей ЛС.

Методом построения полей ЛС решаются исключительно 2D-задачи плоского деформированного состояния, в котором в одном из направлений (ось OY) отсутствует деформация металла. При ПП это условие выполняется, когда длина заготовки в 2 раза превышает ее диаметр. ПКП – это 3D-задача, но при ПКП величина деформации в плоскости XZ значительно превышает осевую деформацию вдоль оси OY . По этой причине анализ напряженно-деформированного состояния при ПП позволяет устанавливать закономерности течения металла при ПКП.

Задача 2D решалась для ПП со следующими параметрами: степень обжатия $\delta = 1,10$; исходный диаметр заготовки $D = 200$ мм; относительная ширина контакта $b = B/D = 0,33$, где B – ширина контакта, равная KL ; угол входа металла в ОД $\varphi_1 = 32^\circ$; угол выхода металла из ОД $\varphi_2 = 8^\circ$; коэффициент трения на контакте $\mu = \tau_{xz}/K = 0,30$; параметр $c = C/D = 0,08$, где C – проекция линии центров O_1 и O_2 на контактную поверхность; параметр $a = A/D = 0,048$ (рис. 2).

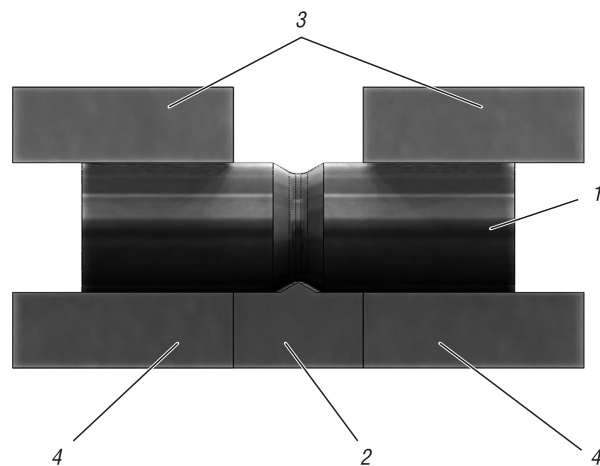


Рис. 1. Схема поперечно-клиновой прокатки одним инструментом: 1 – заготовка, 2 – инструмент, 3 – верхние плашки, 4 – нижние плашки

Fig. 1. The one-tool cross-wedge rolling scheme: 1 – billet, 2 – tool, 3 – upper plates, 4 – bottom plates

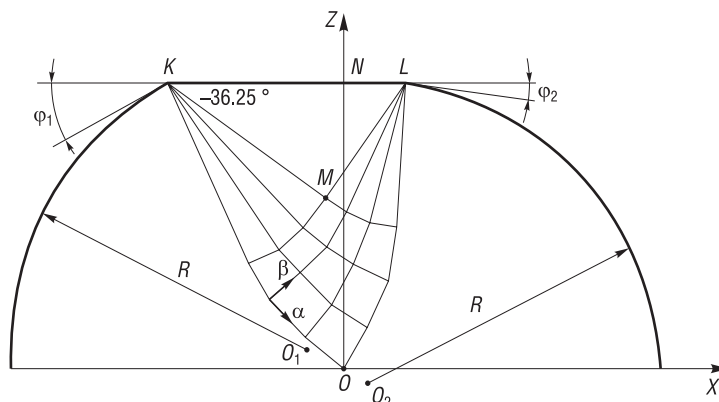


Рис. 2. Поле линий скольжения при поперечной прокатке двумя плитами ($\delta = 1,10$; $\Delta\varphi = 10^\circ$)

Fig. 2. Slip line field from the two-tools cross rolling ($\delta = 1.10$; $\Delta\varphi = 10^\circ$)

Построение поля ЛС при ПП двумя плитами начинаем с вычерчивания треугольника KLM , угол LKM (φ) находим из выражения: $\mu = K \cos 2\varphi$. Из особых точек K и L разворачиваем два веера дуг с шагом поля $\Delta\varphi = 10^\circ$. Таким образом, строится поле до оси заготовки O . Направление α -ЛС и β -ЛС определяем из известного условия [9, 10]: главное нормальное напряжение σ_1 должно находиться в I и III квадрантах α -ЛС и β -ЛС.

Напряжения в узлах поля ЛС определяются формулами Леви [9]:

$$\begin{aligned}\sigma_Z &= \sigma + K \sin 2\varphi; \\ \sigma_X &= \sigma - K \sin 2\varphi; \\ \tau_{XZ} &= K \cos 2\varphi,\end{aligned}\quad (2)$$

где φ – угол поворота оси OX до α -ЛС против часовой стрелки.

Формулы (2) позволяют рассчитать напряжения с точностью до среднего нормального напряжения σ , которое определяется в точке M из условия равенства моментов сил, способствующих и препятствующих вращению заготовки:

$$KL \cdot \tau_{XZ} \cdot ON = (\sigma + K \sin 2\varphi) \cdot KL \cdot A, \quad (3)$$

где A – расстояние от места приложения равнодействующей распорного усилия до оси OZ .

В итоге определено, что в точке M среднее напряжение равно $\sigma/K = -1,404$. Среднее напряжение σ/K в других углах ячеек поля ЛС определяется формулами Генки [9]:

$$\begin{aligned}\sigma + 2K\varphi &= \text{const} \quad \text{вдоль } \alpha\text{-ЛС}; \\ \sigma - 2K\varphi &= \text{const} \quad \text{вдоль } \beta\text{-ЛС}.\end{aligned}\quad (4)$$

Таким образом, подсчитаны средние напряжения во всех узлах ячеек поля ЛС. В центре заготовки среднее напряжение растягивающее и равно $\sigma/K = 0,69$. На контакте нормальное напряжение составляет $\sigma_Z = -2,35K$, среднее напряжение – $\sigma/K = -1,404$.

Решение задачи ПП с одним инструментом методом графического построения полей ЛС. Построение поля ЛС прокатки одним инструментом, как и для ПП двумя инструментами, начинаем с треугольника KLM (рис. 3). Дальнейшее построение поля ЛС осуществляется аналогично предыдущему.

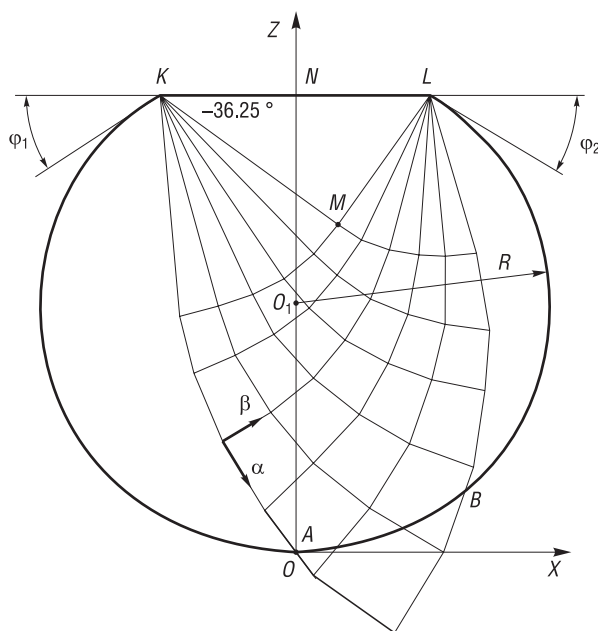


Рис. 3. Поле линий скольжения при поперечной прокатке одним инструментом ($\delta = 1,17$; $\Delta\varphi = 10^\circ$)

Fig. 3. Slip line field from the one-tool cross rolling ($\delta = 1.17$; $\Delta\varphi = 10^\circ$)

Изменяя величину радиуса R , минимизируем ошибку в определении $\tau_{(XZ)i}$ и σ_{Zi} на участке AB свободной поверхности образца. Согласно теории, на участке AB α -ЛС должна выходить на поверхность под углом 45° , $\tau_{(XZ)i} = 0$, $\sigma_{Zi} = 0$. Индекс i показывает различные направления оси OZ от центра заготовки O_1 до различных точек на поверхности AB . В итоге находим положение центра заготовки, величина $R = 59,9$ мм, $O_1N = 50$ мм. В точке A угол выхода α -ЛС на поверхность равен $48,75^\circ$, ошибка составила 7,7 %. В точке B угол выхода на поверхность равен $59,00^\circ$, ошибка составила 20 %.

Расчет площади поперечного сечения образца при $R = 59,9$ мм показал, что его исходный диаметр должен быть 117,4 мм.

Имея информацию об исходном диаметре, определим, что для рассматриваемого случая прокатки степень обжатия равна $\delta = 117,4/(2 \cdot 50) = 1,17$, параметр $b = 66/117,4 = 0,56$, параметр $a = 0,042$. На контактной поверхности нормальное напряжение составляет $\sigma_Z = -3,04K$, среднее напряжение здесь равно

$\sigma/K = -2,046$. Среднее напряжение на участке наружной поверхности AB определяется из условия равенства нормального напряжения нулю $\sigma_z = 0$. С учетом ошибки 7,7 % в точке A :

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \sigma + K \sin [2 \cdot (-48,75^\circ)] = 0; \\ \sigma + K \cdot 0,99 &= 0; \sigma = 0,99K; \sigma/K = +0,99. \end{aligned} \quad (5)$$

Из геометрии поперечного сечения образца определим: $R = 59,9$ мм; $\varphi_1 = 33,4^\circ$; $\varphi_2 = 33,4^\circ$. Используя (4), рассчитаем среднее напряжение σ/K в центре образца (в точке O_1). Оно составляет $\sigma/K = -0,999$, то есть напряжение сжимающее. Распределение среднего напряжения σ/K в ОД показано на рис. 4.

Анализ решений ПП двумя и одним инструментами методом графического построения полей ЛС. Исходя из обоих решений можно сделать вывод, что ПП одним инструментом увеличивает по сравнению с ПП двумя инструментами на контакте нормальное и среднее напряжение на 7,8–14,5 %, изменяет среднее напряжение в осевой области образца с растягивающего на сжимающее. Это обстоятельство значительно увеличивает ресурс пластичности и позволяет прокатывать металлы с ограниченной пластичностью без вскрытия осевой полости.

Решение 3D задачи ПКП одним инструментом методом конечных элементов (МКЭ). Решение 2D двух предыдущих задач не учитывает течение металла вдоль оси OY , и в связи с этим они могут оцениваться как качественные, то есть предназначенные для выявления особенностей ПП одним инструментом без установления количественных зависимостей.

Решение 3D задачи осуществлялось нами с использованием пакета программ LS-DYNA. Компьютерный эксперимент моделировал ПКП одним клиновым инструментом с геометрией $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 5^\circ$ и обжатием $\delta = 1,2$. Заготовка из стали 40X диаметром 30 мм прокатывалась со скоростью $V = 0,3$ м/с при температуре 1170 К. Просчитаем для сравнения две технологии прокатки: двумя инструментами и одним инструментом.

Ресурс пластичности прокатанных деталей зависит от трех параметров прокатки: накопленных деформаций Λ , среднего напряжения σ/K и параметра третьего инварианта девиатора напряжений $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)} / K$, а также пластичности самого металла $\Lambda_{пр}$.

Полученные зависимости изменения среднего напряжения для технологий ПКП одним и двумя инструментами показаны на рис. 5.

Установлена важная закономерность: прокатка одним инструментом обеспечивает снижение на 26 % (0,54/0,68) среднего напряжения. Известно [1], что снижение среднего напряжения однозначно способствует увеличению пластичности металла, согласно [8] для алюминия и меди их пластичность при указанном изменении среднего напряжения возрастает приблизительно на те же 26 %.

Изменение параметра третьего инварианта девиатора напряжений $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)} / K$ по ходу прокатки в осевой области образца для двух вариантов технологий показано на рис. 5. При прокатке одним инструментом параметр третьего инварианта девиатора напряжений $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)} / K$ меньше на 14,4 %, чем при прокатке двумя инструментами. Влияние этого фактора на пластичность металла однозначно: чем ниже параметр, тем выше пластичность. Таким образом, при прокатке одним инструментом оба параметра напряжений увеличивают пластические свойства металла.

На рис. 6 показаны накопленные деформации в осевой области образца при ПКП одним и двумя инструментами. Видно, что ПКП одним инструментом обеспечивает снижение

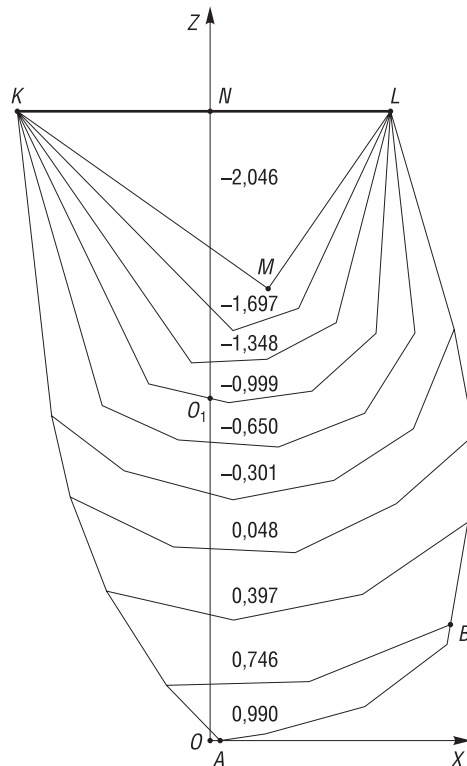
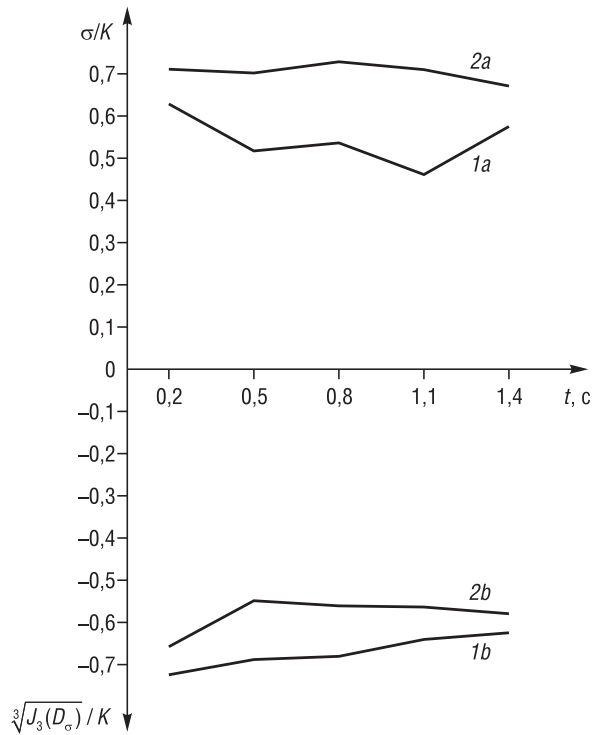


Рис. 4. Среднее напряжение σ/K при поперечной прокатке одним инструментом ($\delta = 1,17$)
 Fig. 4. Average stress σ/K from the one-tool cross rolling ($\delta = 1.17$)



1 – ПКП одним инструментом / the one-tool cross-wedge rolling
2 – ПКП двумя инструментами / the two-tools cross-wedge rolling

Рис. 5. Зависимости изменения в осевой области образца среднего напряжения σ/K во времени при ПКП одним (1a) и двумя (2a) инструментами и аналогичные зависимости параметра третьего инварианта девиатора напряжений $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$ при ПКП одним (1b) и двумя (2b) инструментами ($\delta = 1,2$; сталь 40X; $\alpha = 30^\circ$; $\beta = 5^\circ$; $V = 0,3$ м/с; $T = 1170$ К)

Fig. 5. The dependence of the average stress σ/K in time from one-tool (1a) and two-tools (2a) cross-wedge rolling and the dependence of the parameter of the third invariant of stress deviator $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$ from the one-tool (1b) and two-tools (2b) cross-wedge rolling in the axial region of the sample ($\delta = 1.2$; steel 40X; $\alpha = 30^\circ$; $\beta = 5^\circ$; $V = 0.3$ m/s; $T = 1170$ K)

Заклучение. Качественно оценено изменение напряженно-деформированного состояния путем сравнения полей линий скольжения при традиционной поперечной прокатке двумя инструментами и поперечной прокатке одним инструментом. Поперечная прокатка одним инструментом по сравнению с традиционной поперечной прокаткой двумя инструментами увеличивает на контакте нормальное и среднее напряжение на 7,8–14,5 %, изменяет среднее напряжение в осевой области образца с растягивающего на сжимающее. Это обстоятельство значительно увеличивает ресурс пластичности и позволяет прокатывать металлы с ограниченной пластичностью без вскрытия осевой полости. Впервые решены методом графического построения полей линий скольжения задачи поперечной прокатки одним инструментом.

При прокатке одним инструментом оба параметра напряжений – среднее напряжение σ/K и параметр третьего инварианта девиатора напряжений $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$ – увеличивают пластические свойства металла. Прокатка одним инструментом значительно (более чем в 2,7 раза) увеличивает ресурс пластичности в осевой области образца, что обеспечивает возможность прокатки сплавов ограниченной пластичности.

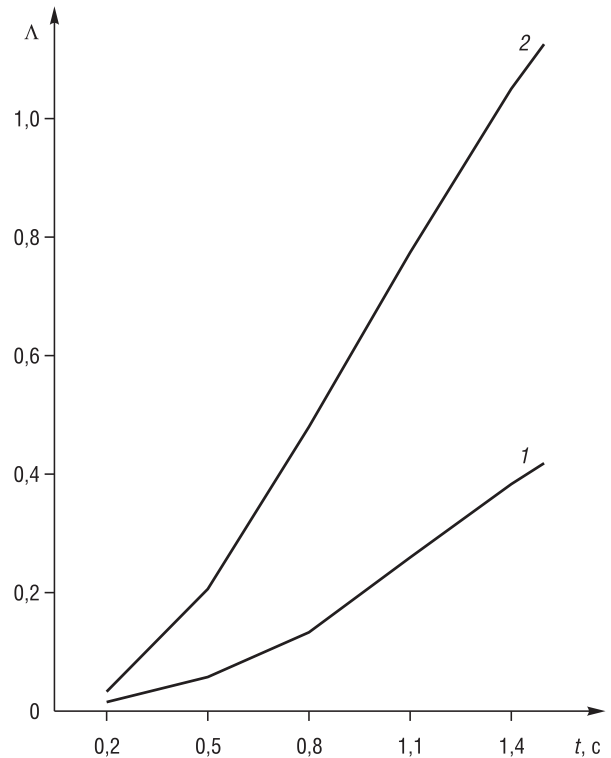


Рис. 6. Зависимости изменения накопленной деформации Λ во времени при ПКП одним (1) и двумя (2) инструментами ($\delta = 1,2$; сталь 40X; $\alpha = 30^\circ$; $\beta = 5^\circ$; $V = 0,3$ м/с; $T = 1170$ К)

Fig. 6. The dependence of the degree of shear strain Λ in time from one-tool (1) and two-tools (2) cross-wedge rolling ($\delta = 1.2$; steel 40X; $\alpha = 30^\circ$; $\beta = 5^\circ$; $V = 0.3$ m/s; $T = 1170$ K)

накопленных деформаций Λ в осевой области образца в 2,7 раза.

Ресурс пластичности линейно зависит от накопленных деформаций Λ , следовательно, с учетом факторов напряженного и деформированного состояния можно констатировать, что при ПКП одним инструментом ресурс пластичности увеличивается более чем в 2,7 раза.

Список использованных источников

1. Кожевникова, Г.В. Теория и практика поперечно-клиновой прокатки / Г.В. Кожевникова. – Минск: Беларуская навука, 2010. – 291 с.
2. Кожевникова, Г.В. Исследование кинематики течения металла при поперечно-клиновой прокатке с использованием компьютерного моделирования / Г.В. Кожевникова // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2013. – № 1. – С. 47–53.
3. Shchukin, V. Y. Cross-wedge rolling at PTI NAS Belarus / V. Y. Shchukin, G. V. Kozhevnikova, V. V. Petrenko // Appl. Mech. Mat. – 2012. – Vol. 201–202. – P. 1198–1202. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.201-202.1198>
4. Астапчик, А.С. Исследование пластичности металла заготовок поперечно-клиновой прокатки / А.С. Астапчик, Г.В. Кожевникова // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2014. – № 3. – С. 31–36.
5. Кожевникова, Г.В. Повышение усталостной прочности валов посредством поперечно-клиновой прокатки / Г.В. Кожевникова, А.О. Рудович, В.Я. Щукин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2017. – № 12. – С. 19–31.
6. Щукин, В.Я. Тенденции развития поперечно-клиновой прокатки / В.Я. Щукин, Г.В. Кожевникова // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2016. – № 2. – С. 7–13.
7. Щукин, В.Я. Белорусская школа поперечно-клиновой прокатки / В.Я. Щукин, Г.В. Кожевникова // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 1. – С. 43–50.
8. Kozhevnikova, G. Cross-wedge rolling / G. Kozhevnikova. – Minsk: Belarus. nauka, 2012. – 321 p.
9. Теоретические основыковки и горячей объемной штамповки / Е.М. Макушок [и др.]. – Минск: Наука и техника, 1968. – 408 с.
10. Кожевникова, Г.В. Самоустановление сил трения при поперечной прокатке / Г.В. Кожевникова // Трение и износ. – 2016. – Т. 37, № 4. – С. 421–426.

References

1. Kozhevnikova G. V. *Theory and Practice of Cross-Wedge Rolling*. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2010. 291 p. (in Russian).
2. Kozhevnikova G. V. Analysis of metal flow kinematics under cross-wedge rolling using computer simulation. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2013, no. 1, pp. 47–53 (in Russian).
3. Shchukin V. Y., Kozhevnikova G. V., Petrenko V. V. Cross-wedge rolling at PTI NAS Belarus. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, vol. 201–202, pp. 1198–1202. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.201-202.1198>
4. Astapchik A. S., Kozhevnikova G. V. Study of metal plasticity of billets processed by cross-wedge rolling. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2014, no. 3, pp. 31–36 (in Russian).
5. Kozhevnikova G. V., Rudovich A. O., Shchukin V. Y. Improving of fatigue strength of shafts by cross-wedge rolling. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem = Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*, 2017, no. 12, pp. 19–31 (in Russian).
6. Shchukin V. Y., Kozhevnikova G. V. Trends of cross-wedge rolling. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem = Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*, 2016, no. 2, pp. 7–13 (in Russian).
7. Shchukin V. Y., Kozhevnikova G. V. Belarusian cross-wedge rolling school of thought. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2016, no. 1, pp. 43–50 (in Russian).
8. Kozhevnikova G. *Cross-Wedge Rolling*. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2012. 321 p.
9. Makushok E. M., Matusevich A. S., Severdenko V. P., Segal V. M. *Theoretical Foundations of Forging and Hot Forging*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1968. 408 p. (in Russian).
10. Kozhevnikova G. V. Self-setting of forces of friction during cross rolling. *Journal of Friction and Wear*, 2016, vol. 37, no. 4, pp. 324–329. <https://doi.org/10.3103/s1068366616040073>

Информация об авторе

Кожевникова Гражина Валерьевна – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории предельной деформируемости и поперечно-клиновой прокатки, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: fti@tut.by

Information about the author

Grazhina V. Kozhevnikova – D. Sc. (Engineering), Chief Researcher of the Laboratory of Extreme Deformability and Cross-Wedge Rolling, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: fti@tut.by