

УДК 621.77

Г. В. Кожевникова, канд. техн. наук

УСЛОВИЯ УСТОЙЧИВОГО ПРОТЕКАНИЯ ПОПЕРЕЧНОЙ И ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЙ ПРОКАТОК

Процессы поперечной и поперечно-клиновой прокатки ограничиваются рядом факторов, основными из которых являются потеря сцепления заготовки с инструментом, вскрытие осевой полости, известное с XIX в. как эффект Маннесмана, и внеконтактная деформация растяжения заготовки. Одна из причин потери сцепления заготовки с инструментом – это недостаточность сил трения. Предложена новая формулировка ограничения устойчивого протекания процесса поперечной прокатки.

Введение

Технологии поперечной прокатки (ПП) и поперечно-клиновой прокатки (ПКП) за последние 40 лет достигли высокого уровня, удовлетворяющего постоянно возрастающим требованиям современного производства. Анализ существующих исследований процессов ПП и ПКП показывает, что в настоящее время достаточно хорошо изучены вопросы геометрии контактных и свободных поверхностей, напряжений и деформаций в пластической области [1]. Дальнейшее развитие теории в области ПП и ПКП нацелено на достижение максимального использования металла, минимизации энергозатрат, максимальной устойчивости процесса и гарантированного качества прокатанных деталей.

Ограничением устойчивого протекания процессов ПП и ПКП является потеря сцепления заготовки с инструментом. Это наблюдается в том случае, когда сил трения на контакте недостаточно для создания момента сил, обеспечивающих вращение заготовки. Для увеличения сил трения на боковой наклонной грани инструмента, как правило, выполняют технологическую поперечную насечку или электроэрозионной обработкой создают поверхность с высокой шероховатостью.

Осевое усилие при ПКП создает растягивающее напряжение в прокатываемом стержне. За счет этого предотвращается искривление оси обрабатываемой заготовки. Если эти напряжения превосходят предел текучести материала, происходит вне-

контактная деформация растяжения прокатываемого стержня с образованием утонения. Если напряжения превосходят предел прочности, происходит обрыв стержня. Обрыв прокатываемого стержня является одним из ограничений устойчивого протекания процесса.

К основным ограничениям, налагаемым на процессы ПП и ПКП, относится вскрытие осевой полости. Это явление, известное как эффект Маннесмана, характерно для большинства разновидностей процесса ПП. В литературе описаны различные гипотезы, качественно объясняющие причины разрушения металла в осевой области заготовки. С использованием феноменологической теории вязкого разрушения В. Л. Колмогорова [2] в работах ФТИ НАН Беларуси показано, что явление вскрытия осевой полости может быть описано количественно. Это позволяет прогнозировать явление осевого разрушения и за счет изменения технологических параметров процесса достигать необходимого уровня ресурса пластичности материала.

1. Условия устойчивого протекания ПП

1.1. Условия устойчивого протекания ПП без потери сцепления заготовки с инструментом

При ПП угловая скорость вращения заготовки ω (рис. 1) меньше угловой скорости вращения ω' условного цилиндра диаметром H , находящегося в

жестком зацеплении с инструментом. Отношение этих скоростей $i = \omega / \omega'$ принято

называть [1] коэффициентом скольжения, который меньше 1.

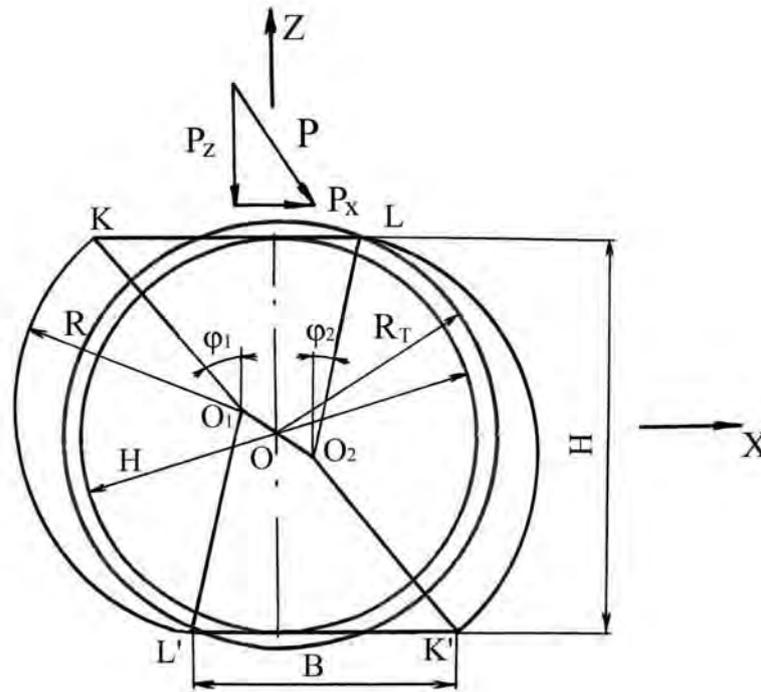


Рис. 1. Схема ПП

Введено [3] понятие коэффициента линейного проскальзывания $\mu_{лин}$, смысл которого заключается в том, насколько медленнее движутся материальные частицы заготовки в приконтактном слое относительно инструмента.

$$\mu_{лин} = \frac{0,5\pi\delta^{-1}r^{-1}}{b + \pi\left(1 - \frac{\varphi_1}{180^\circ} - \frac{\varphi_2}{180^\circ}\right)}, \quad (1)$$

где δ – степень обжатия; b – относительная ширина контакта; r – относительный радиус свободной поверхности прокатываемой заготовки; φ_1, φ_2 – углы между инструментальными плитами и касательной к свободной поверхности в точках ее соприкосновения с площадкой контакта.

Используя информацию о параметрах ПП [1], определены значения коэффициента линейного проскальзывания (1).

Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Со стороны инструмента на прокатываемую заготовку действует две составляющие силы P (см. рис. 1): распорное усилие P_z и сила трения P_x . Величину распорного усилия P_z определяет поле напряжений в очаге деформации. Сила трения P_x как элемент саморегулирования устанавливается на таком уровне, чтобы было достаточным создать момент сил, равный моменту сил, препятствующих вращению заготовки. Увеличение обжатия при ПП сопровождается увеличением проскальзывания $\mu_{лин}$ и момента сил, препятствующих вращению заготовки, что, в свою очередь, приводит к увеличению силы трения P_x и соответственно коэффициента контактного трения $\mu = P_x / P_z$ (рис. 2, а).

Табл. 1. Параметры заготовки при ПП

δ	$\varphi_1, ^\circ$	$\varphi_2, ^\circ$	i	r	b	μ	$\Pi_{\text{лин}}$
1,02	12	1	0,95	0,499	0,18	0,04	1,00
1,05	20	2	0,86	0,496	0,27	0,17	1,06
1,10	32	4	0,75	0,491	0,38	0,32	1,18
1,15	35	7	0,70	0,480	0,43	0,40	1,23
1,20	38	12	0,64	0,468	0,50	0,50	1,31

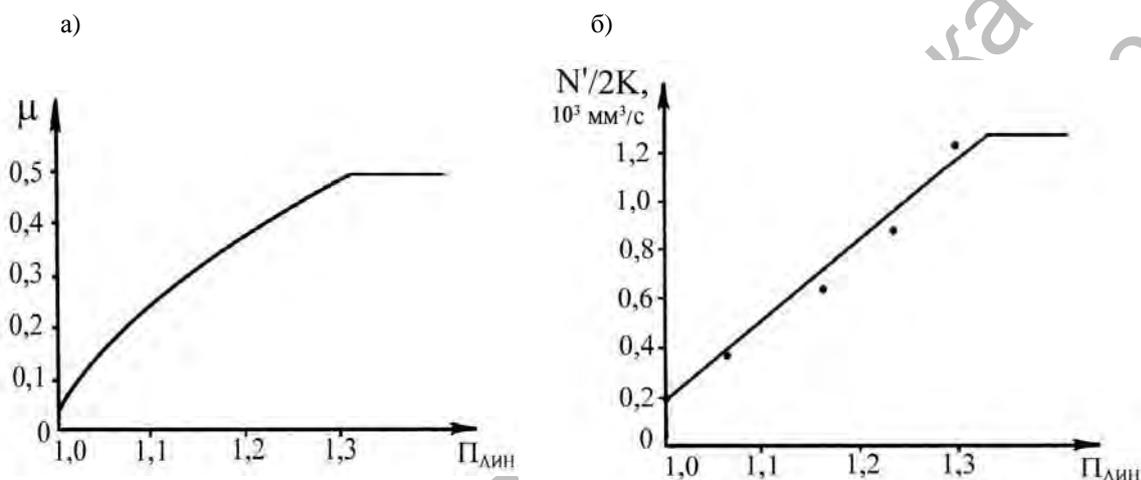


Рис. 2. Зависимости коэффициента трения μ от коэффициента линейного проскальзывания (а) и мощности прокатки от коэффициента линейного проскальзывания (б)

Увеличение обжатия при ПП приводит к увеличению проскальзывания и увеличению сил трения. Максимально возможное касательное напряжение на контакте для жесткопластического тела, согласно условию пластичности Треска–Сен-Венана, $\tau_{\text{max}} = K$. Для деформационно-упрочняемых тел, а также при горячей прокатке (вследствие подстуживания) в поверхностном слое заготовки пластическая постоянная K может значительно превышать этот параметр в остальном объеме заготовки, поэтому на контакте могут развиваться касательные напряжения больше $0,5\sigma_T$, где σ_T – предел текучести материала, усредненный в объеме заготовки.

Таким образом, максимально возможные силы трения на контакте определяют свойства металла в приконтактных

слоях и состоянии контактной поверхности. Условия устойчивого протекания процесса ПП без потери скольжения, согласно нашим доказательствам, могут быть определены как

$$\mu \leq \mu^* \quad \text{или} \quad N \leq N^*,$$

$$\text{или} \quad N d_{\text{лин}} \neq 0, \quad (2)$$

где μ^* и N^* – максимально возможный коэффициент контактного трения и максимально возможная мощность, передаваемая инструментом, которые обеспечивают свойства металла в приконтактном слое.

Экспериментально полученная линейная зависимость мощности ПП от проскальзывания показана на рис. 2, б. Таким образом, по-новому может быть

сформулировано условие устойчивого протекания процесса ПП без потери сцепления заготовки с инструментом (2): устойчивое протекание процесса возможно тогда, пока увеличение проскальзывания при прокатке будет вызывать рост энергии, передаваемой от инструмента к заготовке.

1.2. Исследование условия устойчивого протекания ПП без нарушения сплошности металла в осевой области

Специфическая особенность ПП и ПКП – разрушение металла в виде вскрытия осевой полости (рис. 3), известное как эффект Маннесмана. Явление вскрытия осевой полости может быть описано количественно.

Феноменологическая теория вязкого

разрушения [2, 4] предполагает, что пластическая деформация сопровождается накоплением некоторой безразмерной величины – повреждаемости Π , и при достижении ею предельного значения $\Pi = 1$ происходит разрушение. Если деформация осуществляется в несколько этапов, то итоговая повреждаемость суммируется из повреждаемостей каждого этапа, а критерий разрушения в этом случае устанавливается в виде

$$\sum_{i=1}^n \Pi = 1. \quad (3)$$

Накопление повреждаемости нелинейно, зависит от степени деформации сдвига и увеличивается с исчерпанием ресурса пластичности [5].



Рис. 3. Разрушение на оси заготовки при ПП

Условие разрушения в рамках рассматриваемой нами феноменологической теории вязкого разрушения должно определяться как минимум двумя критериями, и здесь возможно два варианта.

Вариант 1:

$$\Pi = \Pi [J_2(T_\varepsilon)] = 1; \quad (4)$$

$$\Pi = \Pi [J_3(T_\varepsilon)] = 1. \quad (5)$$

Вариант 2:

$$\Pi = \Pi [J_2(D_\varepsilon)] = 1; \quad (6)$$

$$\Pi = \Pi [J_3(D_\varepsilon)] = 1, \quad (7)$$

где $J_2(T_\varepsilon)$, $J_3(T_\varepsilon)$ – второй и третий инварианты тензора деформаций; $J_2(D_\varepsilon)$, $J_3(D_\varepsilon)$ – второй и третий инварианты девиатора деформаций.

Согласно В. Л. Колмогорову [2] разрушение при пластических деформациях наступает, когда накопленные деформации при заданном напряженном состоянии достигают критической величины – для ПП соответственно после определенных циклов нагружения

(рис. 4, а). Критическая величина накопленных деформаций $\Lambda_{пр}$ зависит от напряженного состояния σ/K и ее принято

определять плоской диаграммой пластичности (рис. 4, б).

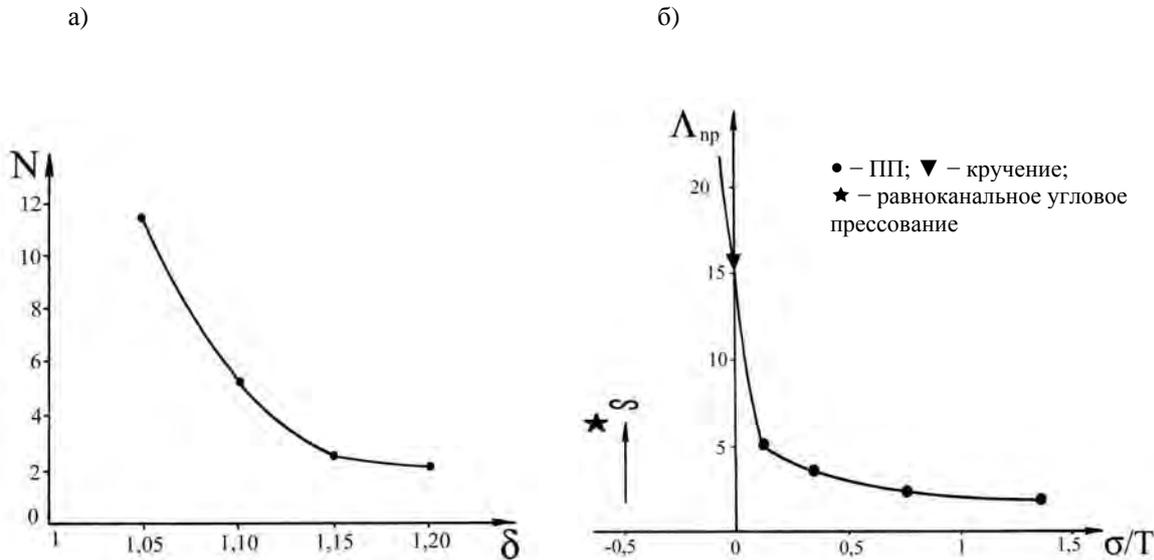


Рис. 4. Зависимости количества циклов нагружения до вскрытия полости от степени обжата при ПП технического свинца (а) и диаграмма пластичности технического свинца (б)

В качестве меры, накопленной до разрушения деформации, как правило, используется интенсивность деформации сдвига:

$$\Gamma = \sqrt{4J_2(D_\varepsilon)} = \sqrt{3}\varepsilon_i = +\sqrt{\frac{2}{3}[(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2] + \gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2}, \quad (8)$$

где $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}/2, \gamma_{yz}/2, \gamma_{zx}/2$ – компоненты тензора деформации.

Сумма интенсивностей последовательно малых деформаций, которую накопила материальная частица металла вдоль траектории ее движения с начала пластической деформацией за время t , равна:

$$\Lambda = \int_0^t H dt, \quad (9)$$

где Λ – степень деформации сдвига; H – интенсивность скоростей деформации сдвига:

$$H = +\sqrt{\frac{2}{3}[(\xi_x - \xi_y)^2 + (\xi_y - \xi_z)^2 + (\xi_z - \xi_x)^2] + \eta_{xy}^2 + \eta_{yz}^2 + \eta_{zx}^2}, \quad (10)$$

где $\xi_x, \xi_y, \xi_z, \eta_{xy}/2, \eta_{yz}/2, \eta_{zx}/2$ – компоненты тензора скорости деформации.

Деформируемость металлов и сплавов можно представить [3] в виде поверхности в координатах: степень интенсивности сдвига в зависимости от первого инва-

рианта тензора напряжений и корня кубического из третьего инварианта девиатора напряжений (рис. 5). Таким образом, диаграммы пластичности являются частным случаем поверхности деформируемости.

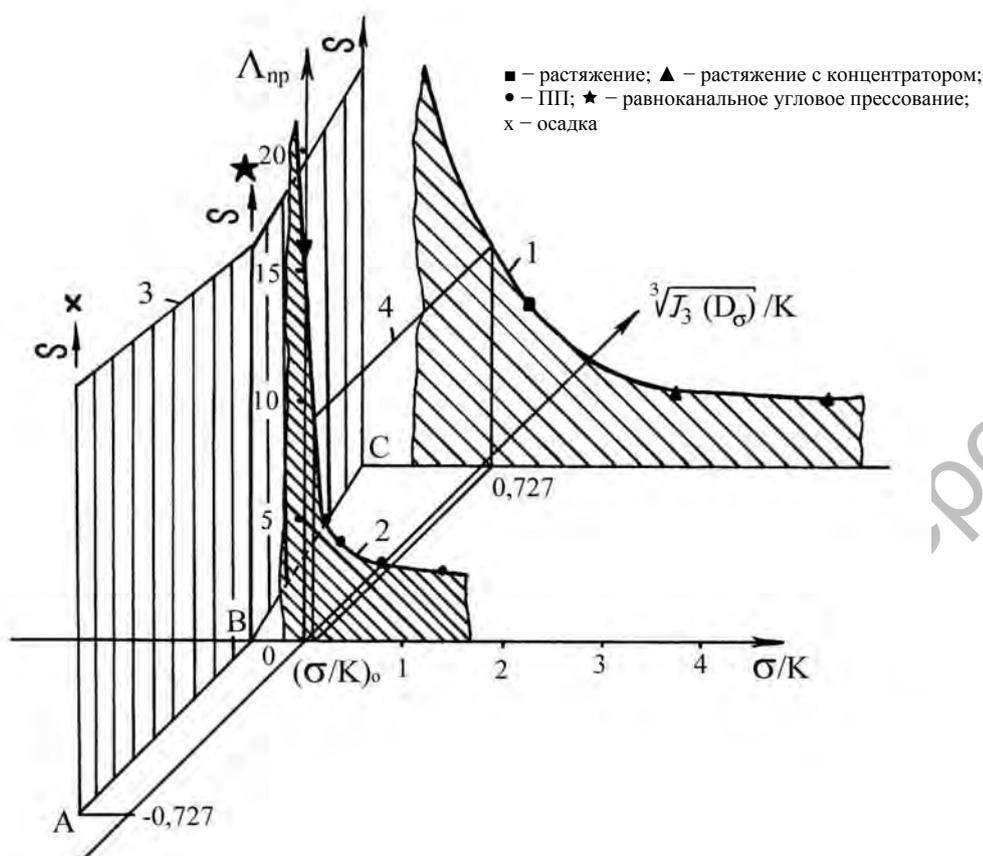


Рис. 5. Поверхность деформируемости технического свинца

В процессе испытаний на техническом свинце при температуре 293 К определялась предельная степень интенсивности сдвига $\Lambda_{пр}$. Напряжения при различных методах рассчитывались по известным формулам [1–4] и определялись их компоненты σ/K и $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$.

Растяжения цилиндрического образца (гладкого и с концентраторами) относятся к монотонным осесимметричным деформациям. Параметр $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$ при этом равен 0,727. Сжатие также относится к монотонным осесимметричным деформациям, параметр $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$ в этом случае равен $-0,727$. ПП, кручение трубы и равноканальное угловое прессование относятся к процессам с плоскодеформированным состоянием. Параметр $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$ в этом случае равен нулю.

На рис. 5 показана зависимость предельной степени интенсивного сдвига $\Lambda_{пр}$ технического свинца от двух параметров: σ/K и $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$ [3]. Кривая 1 отображает указанную зависимость в плоскости $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K = 0,727$; кривая 2 – то же, в плоскости $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K = 0$. При сжатии цилиндрический образец из технического свинца не удалось разрушить, поэтому в плоскости $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K = -0,727$ определено одно значение $\Lambda_{пр} = \infty$ при $\sigma/K = -0,577$.

Проанализируем результаты эксперимента. Диаграммы пластичности в различных плоскостях $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K = \text{const}$ отличаются одна от другой, при этом сохраняется общая зависимость: снижение параметра σ/K сопровождается рос-

том деформируемости. Наблюдается поверхность ABC, перпендикулярная плоскости $\sigma/K - \sqrt[3]{J_3(D_\sigma)} / K$, в рамках которой предельная степень деформации сдвига бесконечна: $\Lambda_{пр} = \infty$. Влияние третьего инварианта девиатора напряжений (в наших исследованиях $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)} / K$) неоднозначно: в одной области $\sigma / K > \sigma_0 / K$ (см. рис. 5) – сопровождается в ходе наших экспериментов ростом деформируемости, в другой области $\sigma/K < \sigma_0 / K$ – его рост сопровождается снижением деформируемости.

В ходе экспериментов не были установлены случаи, когда конкретной точке на плоскости $\sigma/K - \sqrt[3]{J_3(D_\sigma)} / K$ не соответствовало одно единственное значение $\Lambda_{пр}$. Это позволяет утверждать, что для каждого материала с его историей обработки при стабильных температурно-скоростных условиях имеется единственная поверхность пластичности $\Lambda_{пр} = \Lambda_{пр} \left[(\sigma/K), (\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K) \right]$, описывающая пластические свойства материала.

2. Условия устойчивого протекания ПКП

2.1. Определение условий устойчивого протекания ПКП без потери сцепления заготовки с инструментом

Устойчивое протекание ПКП может быть ограничено потерей сцепления заготовки с инструментом, определяемой тремя критериями.

Критерий 1. Коэффициент контактного трения

С увеличением обжатия при ПКП как элемент саморегулирования увеличивается трение на контактной поверхности, величина которого ограничена состоянием поверхности инструмента и свойствами подстуженного поверхностного слоя заготовки, а также свойствами окалина на поверхности деформируемого металла. В итоге коэффициент контактного трения μ для конкретных условий не может превышать некоторой граничной величины μ^* . Условие устойчивого протекания ПКП без

потери сцепления, таким образом, может быть записано аналогично ПП (2) в виде

$$\mu \leq \mu^* . \quad (11)$$

Проиллюстрируем это условие на примере (рис. 6). Согласно [1] параметр μ^* при температуре 1273 К не может быть больше 0,6. Потеря сцепления при прокатке стали 45 при температуре 1273 К на инструменте ($\alpha = 30^\circ$; $\beta = 5^\circ$) наступает при $\delta = 2,0$ [6]. Таким образом, в данном случае $\mu^* = 0,7$. Расхождение может быть отнесено на погрешность экспериментальных измерений и разброс величины сил контактного трения.

Критерий 2. Равенство МСВ и МСФ

Момент сил вращения (МСВ) равен $P_X(D + d) / 4$, где P_X – усилие ПКП, при расчете которого следует учитывать μ^* вместо μ . В этом случае виртуально в процессе устойчивого протекания ПКП момент сил вращения больше момента сил формоизменения ($МСВ > МСФ$), т. к. $\mu^* > \mu$. Термин «виртуально» подчеркивает, что указанное неравенство существует только в расчетах, – в реальных физических процессах по третьему закону механики всегда $МСВ = МСФ$. В момент потери устойчивости процесса по проскальзыванию $\mu = \mu^*$ и $МСВ = МСФ$. При дальнейшем увеличении обжатия получим виртуальное неравенство $МСВ < МСФ$.

Критерий 3. Работа деформации

Впервые предложен критерий, оценивающий характер работы формоизменения при прокатке. Критерий равен производной работы деформации от проскальзывания. Увеличение обжатия сопровождается снижением производной и при достижении ею критической величины происходит потеря сцепления заготовки с инструментом.

$$K' = \frac{A_{i+1} - A_i}{A_{i+1}(p_{i+1} - p_i)} \geq \text{const} . \quad (12)$$

Физический смысл критерия (12) заключается в следующем. В идеале по-

теря сцепления наступает тогда, когда прирост проскальзывания не приводит к приросту работы ($K' = 0$). На практике вследствие, например, разброса сил трения потеря сцепления должна наступать раньше. Допустимо предположить, что для конкретной стали, конкретных мас-

штабных факторов, конкретных температурно-скоростных условий критерий постоянен. Используя известные [3] экспериментальные данные об усилиях прокатки и радиусе качения, вычислим критерий K' . Результаты вычислений представлены на рис. 7.

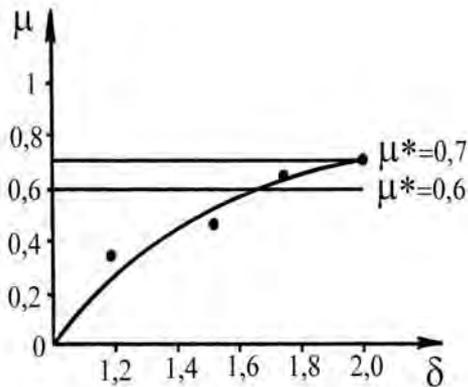


Рис. 6. Зависимость коэффициента контактного трения от обжатия при ПКП

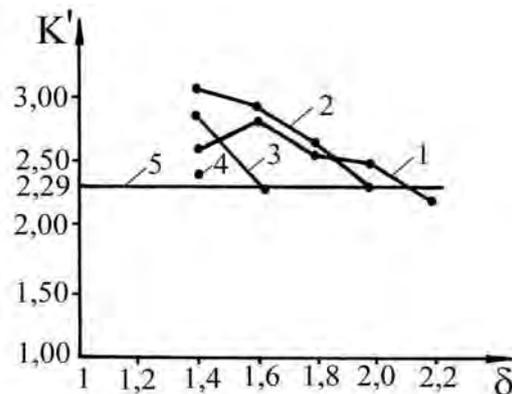


Рис. 7. Зависимости критерия K' от обжатия: 1 – $\beta = 3^\circ$; 2 – $\beta = 5^\circ$; 3 – $\beta = 7^\circ$; 4 – $\beta = 10^\circ$; 5 – $K = 2,29$

Наглядно видно, что при прокатке прутка из стали 45 диаметром 20 мм при температуре 1273 К на клиньях ($\alpha = 30^\circ$; $\beta = 3...10^\circ$) потеря сцепления наступает при $K = 2,29$.

2.2. Определение условия устойчивого протекания ПКП без внеконтактной деформации растяжения

Если в прокатываемом стержне осевое усилие P_Y превысит предел текучести σ_T , в нем начнется внеконтактная деформация растяжения. Математически это условие запишется [1] в виде

$$P_Y \leq \frac{\pi d^2}{4} \sigma_T N. \quad (13)$$

Если напряжение растяжения в стержне достигнет предела прочности σ_B , то произойдет обрыв прокатываемого стержня. Условие устойчивого протекания ПКП без обрыва стержня запишется [1] как

$$P_Y \leq \frac{\pi d^2}{4} \sigma_B N. \quad (14)$$

В формулах (13) и (14) следует различать, что в очаге деформации ПКП действует сопротивление деформации σ_S в прокатываемом стержне – другой очаг деформации, в котором действуют или σ_T , или σ_B , которые отличны от σ_S , т. к. в обоих очагах деформации различны относительная деформация ε , скорость деформации u , температура деформации T .

Предложено упрощенное условие устойчивого протекания процесса без внеконтактной деформации растяжения, пригодное для инженерных расчетов:

$$K'' = \sqrt{\frac{r_k \beta \tan \alpha}{\pi \delta}} \left[\delta \mu + \left(\sin \alpha + \mu \frac{4r_r \delta - \delta - 1}{\delta - 1} \right) \times \left(\frac{\delta - 1}{\sin \alpha} - \frac{\pi r_k \beta}{\cos \alpha} \right) \right] \leq 0,25. \quad (15)$$

Критерии K' и K'' справедливы в следующих диапазонах ПКП: $1 < \delta < 1,8$; $20^\circ < \alpha < 40^\circ$; $3^\circ < \beta < 12^\circ$; $20 \leq D < 40$ мм; $1173 \text{ К} < T < 1473 \text{ К}$; $0,2 \text{ м/с} < v < 0,5 \text{ м/с}$.

3. Расчет критериев устойчивого протекания технологий ПКП

Для технологии ПКП заготовки шарового пальца № 2141-2904208 определим устойчивость протекания ПКП по потере сцепления заготовки с инструментом по критерию K' (12), используя

[7] экспериментальные данные об усилиях прокатки и радиусе качения. При прокатке прутка из стали 45 диаметром 20 мм при температуре 1273 К на клиньях ($\alpha = 30^\circ$; $\beta = 3 \dots 10^\circ$) потеря сцепления наступает при $K' = 2,29$.

Рассчитанный запас устойчивости прокатки заготовки шарового пальца от потери сцепления заготовки с инструментом по длине инструмента [7] показан на рис. 8, а. Условие устойчивой прокатки $K' > 2,29$ выполняется на всех участках инструмента.

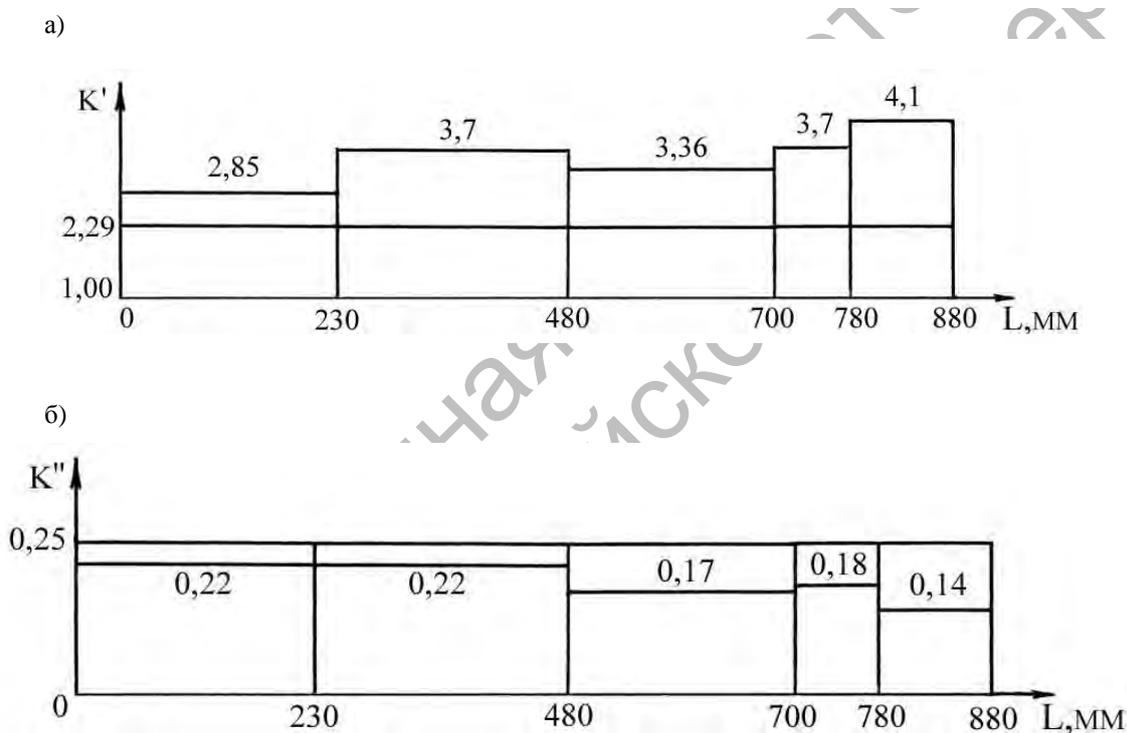


Рис. 8. Запас устойчивости ПКП заготовки шарового пальца: а – по критерию K' от потери сцепления заготовки с инструментом; б – по критерию K'' от разрыва заготовки

Рассмотрим устойчивость протекания ПКП шарового пальца без внеконтактной деформации растяжения по критерию K'' (15). Устойчивая прокатка пальца шарового без внеконтактной деформации растяжения по критерию K'' осуществляется, если критерий K'' не превышает 0,25. Рассчитанный запас устойчивости прокатки от разрыва заготов-

ки шарового пальца по длине инструмента показан на рис. 8, б.

Как видно из рис. 8, оба условия устойчивого протекания выполняются на всех переходах прокатки заготовки, что подтверждено практической реализацией технологии ПКП заготовки шарового пальца [7].

Выводы

1. Предложена новая формулировка ограничения ПП и ПКП в результате потери сцепления заготовки с инструментом: процесс может быть реализован до той поры, пока прирост проскальзывания сопровождается увеличением мощности прокатки.

2. Деформируемость металлов и сплавов определяется двумя независимыми параметрами напряженного состояния: первым инвариантом тензора напряжений и третьим инвариантом девиатора напряжений, связанных, в свою очередь, условием пластичности со вторым инвариантом тензора напряжения. В этой связи деформируемость графически может быть представлена в виде поверхности в координатах: степень деформации сдвига, отношение первого инварианта тензора напряжений к пластической постоянной, отношение третьего инварианта девиатора напряжений к пластической постоянной.

3. Разработан новый критерий устойчивого протекания ПКП без потери сцепления заготовки с инструментом, основанный на закономерности изменения работы формоизменения в зависимости от коэффициента проскальзывания.

4. Предложен и реализован в расчетах технологии ПКП критерий устойчи-

вого протекания процесса без внеконтактной деформации растяжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Щукин, В. Я.** Основы поперечно-клиновой прокатки / В. Я. Щукин. – Минск : Наука и техника, 1986. – 223 с.
2. **Колмогоров, В. Л.** Напряжения, деформации, разрушение / В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1970. – 230 с.
3. **Кожевникова, Г. В.** Развитие теории и технологии формообразования осесимметричных ступенчатых деталей поперечной прокаткой / Г. В. Кожевникова. – Минск : Белорус. наука, 2005. – 250 с.
4. **Красневский, С. М.** Разрушение металлов при пластическом деформировании / С. М. Красневский, Е. М. Макушок, В. Я. Щукин ; под ред. А. В. Степаненко. – Минск : Наука и техника, 1983. – 173 с.
5. **Исаевич, Л. А.** Нелинейность накопления повреждаемости при знакопеременном кручении / Л. А. Исаевич, Г. В. Кожевникова ; под ред. И. П. Филонова // Машиностроение : сб. науч. тр. – Минск : Технопринт, 2003. – Вып. 19. – С. 479–484.
6. **Клушин, В. А.** Совершенствование поперечно-клиновой прокатки / В. А. Клушин, Е. М. Макушок, В. Я. Щукин ; под ред. В. В. Клубовича. – Минск : Наука и техника, 1980. – 280 с.
7. **Кожевникова, Г. В.** Технологические параметры поперечно-клиновой прокатки заготовки пальца шарового / Г. В. Кожевникова // Современные технологии металлообработки : материалы междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2005. – С. 195–199.

Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси
Материал поступил 10.06.2008

G. V. Kozhevnikova
Criteria of cross rolling and cross-wedge rolling stable processing

Cross rolling and cross-wedge rolling processes are limited by a range of factors the main ones of which are: loss of cohesion of a blank with the tool, breaking down of axial space known from the 19th century as Mannesman's effect and out-of-contact deformation of the blank stretching. One of the factors restricting stable cross rolling processing is the cohesion loss between the tool and the workpiece. The main reason for that is friction forces exhaustion. New formulation of process restriction is suggested in the paper.