

УДК 621.73.01

Сухоруков С. И.

### ОЦЕНКА ИСПОЛЬЗОВАННОГО РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ ПРИ ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЙ ПРОКАТКЕ

Поперечно-клиновое прокатка (ПКП) – высокопродуктивная технология обработки металлов давлением с коэффициентом использования металла 0,8–0,98 (рис. 1). Основными преимуществами данного процесса являются:

- уменьшение затрат металла на 10-30%;
- увеличение продуктивности труда в 3-7 раз;
- повышение точности заготовок, а следовательно, уменьшение трудоемкости механической обработки.

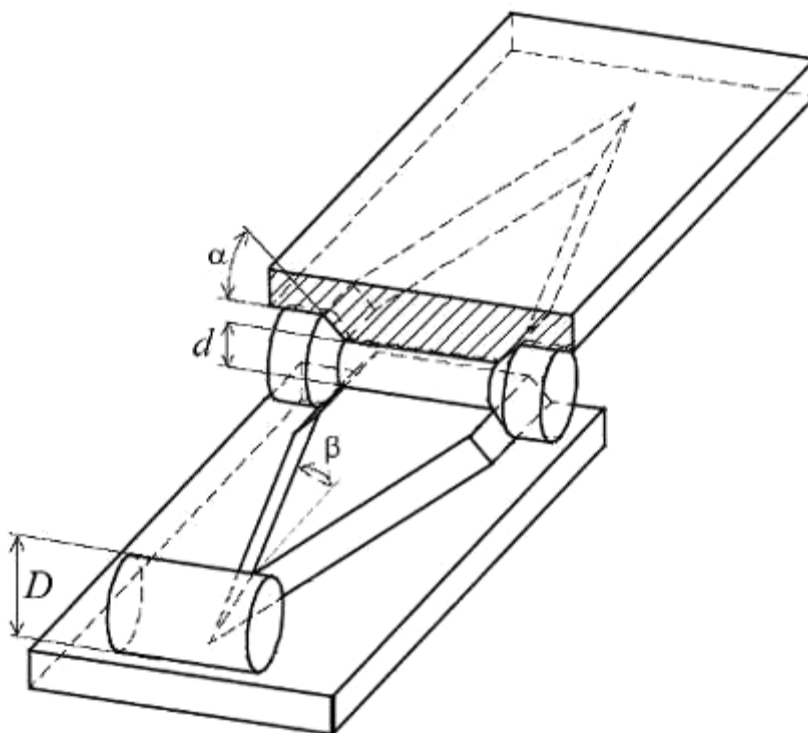


Рис. 1. Схема плоского клинового инструмента ПКП и его конструктивно-технологические параметры:

- $\alpha$  – угол наклона боковой грани;  $\beta$  – угол заострения;  
 $D$  – диаметр заготовки;  $d$  – диаметр прокатанной ступени заготовки.

При исследовании процесса ПКП достаточно сложными являются оценка НДС в заготовке и определение параметров трения между инструментом и заготовкой.

Трудности возникают из-за самой схемы поперечно-клиновой прокатки, в которой, совмещены объемная пластическая деформация и неустановившееся течение металла. На данный момент не существует физической модели процесса, которая может описать причины возникновения основных дефектов, возникающих в заготовке, полученной при ПКП: 1) появление трещины или полости на оси заготовки (эффект Манесманна); 2) внешние дефекты (спиральные канавки, зажимы); 3) незахват инструментом заготовки, что приводит к невозможности её вращательного движения и сильному искажению геометрии полученного изделия. Из этого можно сделать вывод, что необходимость изучения процесса ПКП и исследование причин появления брака является актуальной задачей.

Разделяют два вида внутренних дефектов: трещины и пустоты на оси заготовки и кольцевые трещины [1, 2]. Смирнов В. С. [3] изучил процесс образования трещины и сделал вывод, что они возникают из-за совмещения сдвиговых и растягивающих напряжений в заготовке. Целиков А. И. [4] утверждал, что внутренние дефекты образуются вследствие накопления повреждений обусловленных ростом растягивающего напряжения в процессе формообразования заготовки. Danno A. и Awano T. [5] обнаружили, что размер пустоты на оси увеличился с увеличением количества оборотов заготовки. Авторы показали, что рост трещин был вызван растягивающими напряжениями и деформацией сдвига, вызванной циклической нагрузкой в центральной области заготовки.

Целиков А. И. предложил приблизительный метод для определения максимального растягивающего напряжения на оси заготовки, заменив объемную задачу плоской, т.е. рассматривал обжим цилиндра плоскими плитами. В работе [6] для определения напряжений использовался метод линий скольжения. Изучением внедрения клина методом линий скольжения занимался Потапкин В. Ф. [7]. Автором так же рассматривалось влияние геометрии клина инструмента при ПКП на деформируемость заготовок при помощи линий скольжения [8]. Higashino T. и др. [9], которые установили, что распределение напряжений в поперечном сечении заготовки, которая подвергается ограниченному ротационному обжатию, приводило к неравномерному распределению твердости от поверхности к центру. Более высокие напряжения приводили к более высокой твердости. Данное утверждение справедливо и для радиального сечения заготовки [10].

Кожевникова Г. В. [11] методом верхней оценки определила оптимальную геометрию сечения прокатываемых деталей при поперечной прокатке, обеспечивающую минимальную энергию формообразования. Установлено влияние деформационного упрочнения металла на геометрические параметры заготовки.

Выполненные ранее исследования основаны на двухмерной постановке задачи по определению НДС на оси заготовки при ПКП. Они не учитывали влияние перемещения металла в процессе формообразования в осевом направлении.

Целиков А. И. и др. [12] на основе экспериментальных исследований показали, что скручивание заготовки в процессе пластической деформации при поперечно-клиновой прокатке возникает из-за изменения величины площади контакта инструмента и заготовки. На самой площади контакта существуют области отставания и области опережения, т.е. скорость движения инструмента не совпадает со скоростью движения частиц материала заготовки в зоне контакта.

Принимая во внимание выше перечисленное, можно сделать вывод, что основными причинами появления брака в заготовках при ПКП являются:

- циклическая нагрузка и соответственно циклические напряжения, возникающие на оси заготовки, которые приводят к проявлению эффекта Манесманна;
- скручивание заготовки из-за большой разницы между скоростью инструмента и скоростью частиц материала заготовки в зоне контакта;
- накопление микротрещин из-за циклического нагружения.

Несмотря на то, что эффект Манесманна был известен уже в течение ста лет, на данный момент не существует теории, которая полностью описывала бы принципы формообразования при ПКП.

Целью работы является оценка использованного ресурса пластичности в опасной зоне при ПКП в зависимости от угла наклона боковой грани клина  $\alpha$  и угла заострения  $\beta$ .

С развитием методов компьютерного моделирования стало возможным исследование напряженно-деформированного состояния на оси заготовки численными методами.

В работах [13, 14] решена задача определения энергосиловых параметров и НДС методом конечных элементов. Наиболее распространенной программой для решения динамических задач методом МКЭ является программный пакет ANSYS/LS-DYNA.

Кратко опишем конечно-элементную модель процесса поперечно-клиновой прокатки плоским инструментом (рис. 2). Модель состоит из цилиндрической заготовки и двух равноудаленных от заготовки инструментов, на которых расположены рабочие грани.

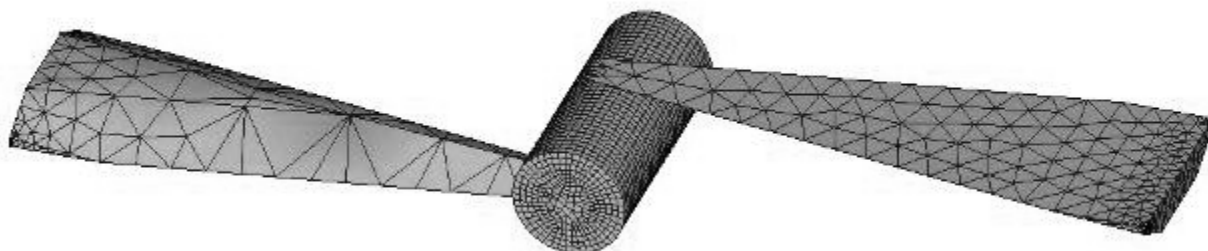


Рис. 2. Конечно-элементная модель процесса поперечно-клиновой прокатки.

Для расчета используются 8-узловые конечные элементы. При этом инструмент представлен в виде абсолютно твердого тела, для уменьшения времени расчета. На него наложены такие граничные условия: он может перемещаться только по координате  $x$  с постоянной скоростью; перемещение по осям  $y$ ,  $z$  и вращение вокруг всех осей отсутствует. Контакт между заготовкой и инструментом определяется при помощи автоматического контактного алгоритма типа “поверхность-поверхность”.

Сравнение результатов, полученных при помощи МКЭ и экспериментальных исследований, было проведено автором на оборудовании ВАТ «ВЗТА». В исследовании использовалась составная заготовка (рис. 3). Она представляла собой полый цилиндр, в который запрессован с натяжением в горячем состоянии другой цилиндр с нанесенной на него сеткой. Места стыков двух цилиндров на торцах заваривались для исключения возможности вращения одного цилиндра относительно другого при формообразовании. Были определены напряжения и деформации в заготовке в процессе поперечно-клиновой прокатки. Сравнение полученных данных с расчетами НДС методом конечных элементов дало погрешность не превышающую 10%. Полученную погрешность можно объяснить частичным проскальзыванием одного цилиндра заготовки относительно другого при формообразовании.

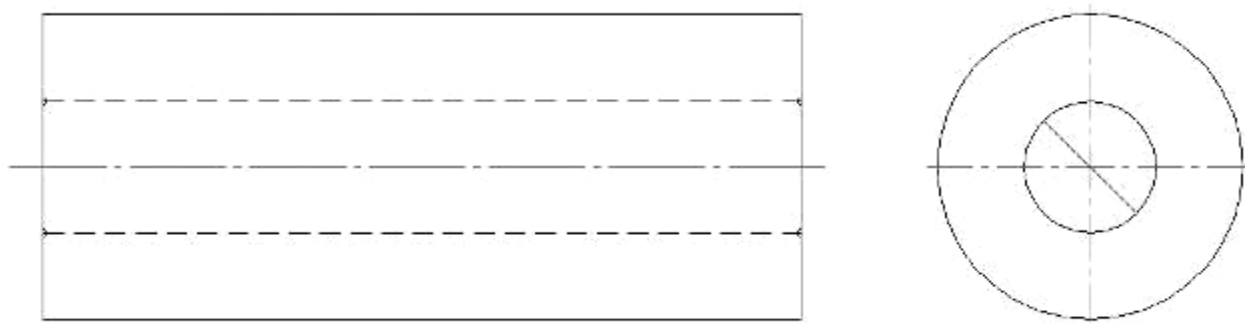


Рис. 3. Схема заготовки для экспериментов при ПКП.

Также нами было проведено сравнение результатов определения НДС, полученных методом твердостей и МКЭ [10].

На основе представленных данных можно сделать вывод, что метод конечных элементов дает достоверные результаты при определении параметров НДС при поперечно-клиновой прокатке.

Для оценки влияния напряженно-деформированного состояния на пластичность заготовки использовали инвариантные характеристики [15]:

– параметр Надаи-Лоде:

$$\mu_{\sigma} = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1; \quad (1)$$

– показатель напряженного состояния:

$$\eta = \frac{I_1(T_{\sigma})}{\sqrt{3I_2(D_{\sigma})}} = \frac{3\sigma}{\sigma_u} \quad (2)$$

где  $I_1(T_{\sigma})$  – первый инвариант тензора напряжений;

$I_2(D_{\sigma})$  – второй инвариант девиатора напряжений;

$\sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij}$  – среднее напряжение;

$\sigma_u$  – интенсивность напряжений;

– степень деформации:

$$e_u = \int_0^t \dot{\epsilon}_u d\tau \quad (3)$$

где  $\dot{\epsilon}_u$  – интенсивность скоростей деформации;

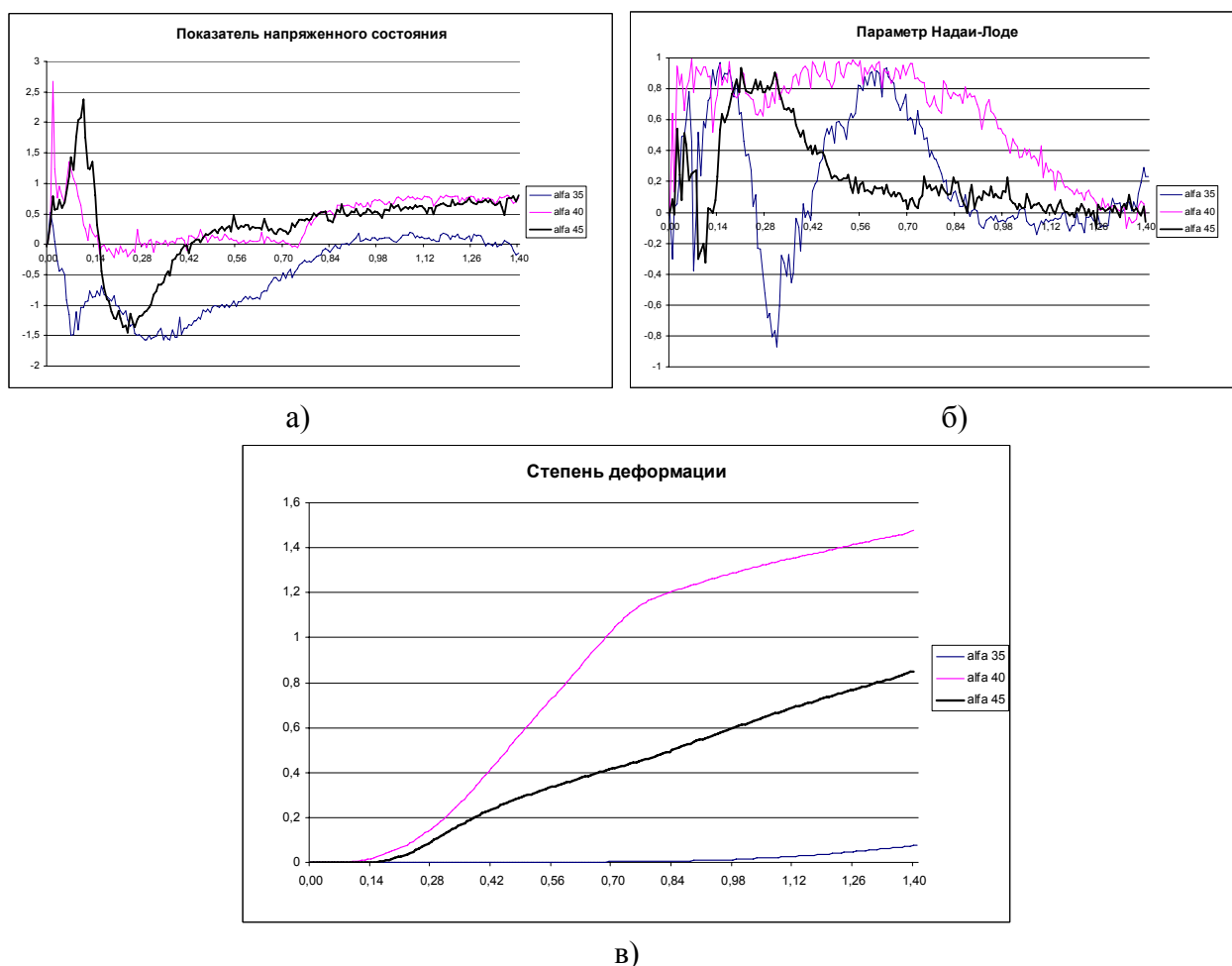


Рис. 4. Изменение показателей напряженно-деформированного состояния и степени деформации при поперечно-клиновой прокатке при  $\beta = 9,5^\circ$  и углах наклона боковой грани  $\alpha = 35^\circ; 40^\circ; 45^\circ$ .

На рис. 4, 5 представлены графики изменения параметров НДС в процессе прокатки для точки расположенной на оси заготовки в сечении проходящем через плоскость симметрии заготовки.

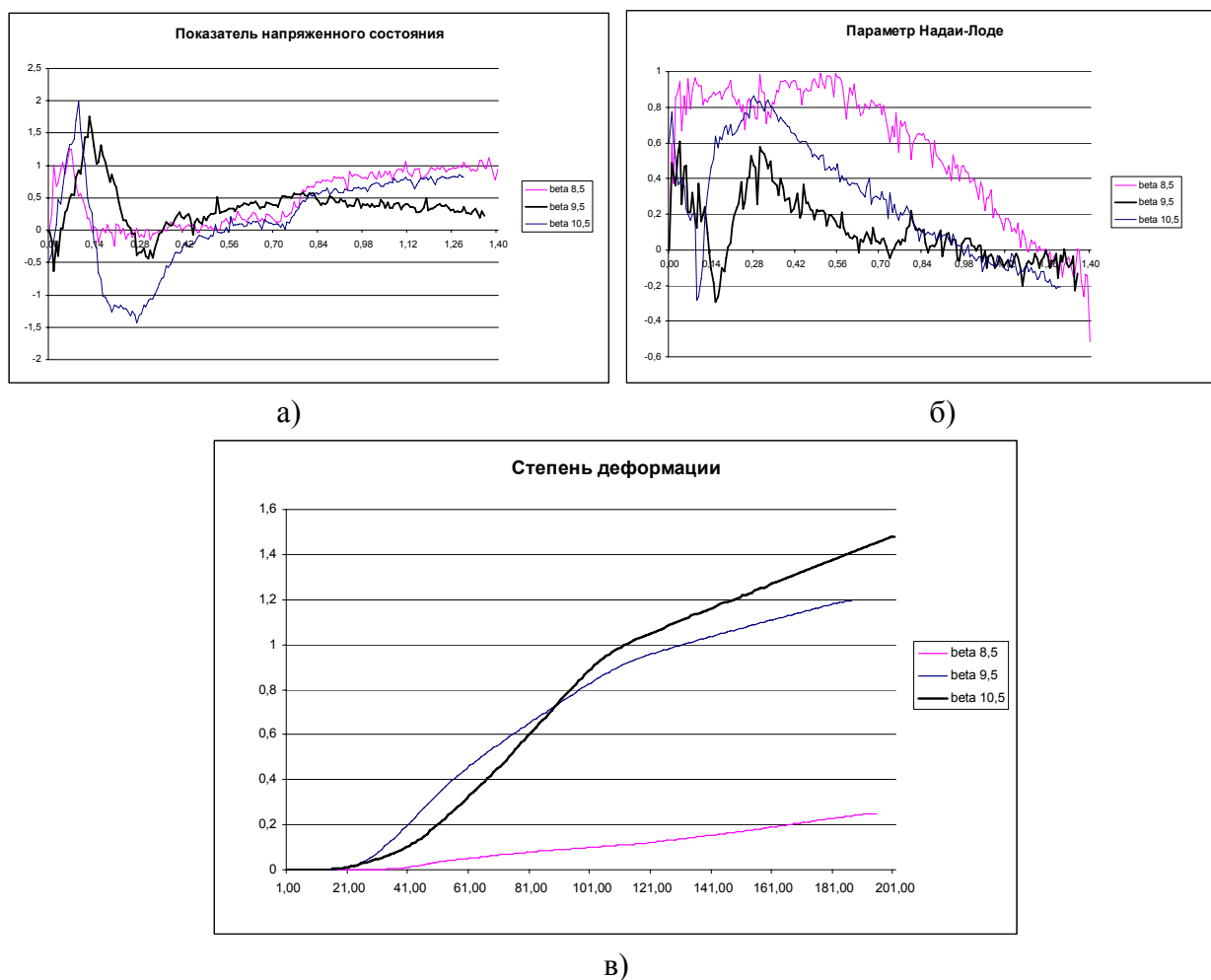


Рис. 5. Изменение показателей напряженно-деформированного состояния и степени деформации при поперечно-клиновой прокатке при  $\alpha = 45^\circ$  и углах заострения  $\beta$ , равных  $8,5^\circ$ ;  $9,5^\circ$ ;  $10,5^\circ$ .

Для расчета использованного ресурса пластичности использовали поверхности граничных деформаций  $e_p(\eta, \mu_\sigma)$  для стали 18ХГТ при температуре  $950^\circ\text{C}$ , которую аппроксимировали выражением

$$e_p(\eta, \mu_\sigma) = 1,8 \exp(0,4\mu_\sigma - 0,5\eta). \quad (4)$$

Использованный ресурс пластичности находили по критерию

$$\dot{X} = \int_0^t \frac{de_u}{e_p(\dot{\eta}, \mu_\sigma)}. \quad (5)$$

Данную методику расчета использовали для изучения влияния основных параметров поперечно-клиновой прокатки на использованный ресурс пластичности.

Полученные зависимости  $\eta(t)$ ,  $\mu_\sigma(t)$ ,  $e_u(t)$  были использованы для построения траекторий нагружения и расчета использованного ресурса пластичности по формуле (5) для опасной, с точки зрения разрушения, точки.

Установлено что, с увеличением угла наклона боковой грани клина  $\alpha$  использованный ресурс пластичности уменьшается. Но при этом нужно помнить, что при больших углах  $\alpha$  повышается вероятность образования шейки на прокатываемой детали из-за значительного увеличения растягивающих напряжений. Минимальное значение угла наклона боковой грани клина не должно быть меньше  $35^\circ$ , так как при меньших значениях угла растет использованный ресурс пластичности и повышается вероятность образования полости на оси заготовки. Поэтому нужно принимать угол  $\alpha$  в пределах  $35^\circ < \alpha < 45^\circ$ .

Для горячей поперечно-клиновой прокатки необходимо использовать угол заострения  $3 \leq \beta \leq 13^\circ$ . Так как при увеличении значения угла  $\beta$  больше  $13^\circ$  происходит значительный рост радиальных сил действующих на заготовку. При этом осевые силы практически остаются без изменений. В результате этого растет величина использованного ресурса пластичности в опасной зоне заготовки.

Наиболее интенсивное накопление повреждений и увеличение использованного ресурса пластичности происходит с момента от контакта инструмента с заготовкой до внедрения клина инструмента в заготовку на полную глубину. Однако на участке калибрования использованный ресурс пластичности также растет, но с меньшей скоростью. Поэтому длина калибрующего участка должна быть ограничена.

#### Выводы

На основе анализа влияния основных параметров процесса поперечно-клиновой прокатки на использованный ресурс пластичности установлено, что для получения заготовок, в которых  $\psi \leq 0.8$  в опасной, с точки зрения разрушения, зоне при ПКП значение угла наклона боковой грани клина  $\alpha$  должно находиться в пределах от  $35^\circ$  до  $45^\circ$ , а угол заострения  $3 \leq \beta \leq 13^\circ$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Целиков А.И. Элементы теории поперечной прокатки и холодная прокатка на трехвалковых станах / А.И. Целиков, В.М. Луговской, Е.М. Третьяков // *Вестник машиностроения*. – 1961. – №7. – С. 53-64.
2. Sugiyama H. The central cavity of transversely hot rolled shafts. – Aichi, Japan, 1971.
3. Смирнов В.С. Теория прокатки. – М.: Металлургия, 1967. – 460 с.
4. Целиков А.И. Теория расчёта усилий в прокатных станах. – М. Металлургия, 1970. – 230 с.
5. Danno A., Awano T. Effect of rolling conditions on formation of central cavity in 2-roll cross rolling. *Journal of JSTP*. – 1976. – № 17. – P. 31-46.
6. Теория прокатки: Справочник / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин и др. – М.: Металлургия, 1982. – 335 с.
7. Потапкин В.Ф. Метод линий скольжения в теории процессов обработки металлов давлением. – Краматорск: ДГМА, 2005. – 160 с.
8. Сухоруков С. И. Вплив геометрії клина на деформуємість заготовки при поперечно-клиновій прокатці // *Вісник ВПІ*. – 2005. – № 2.
9. Saito Y., Higashino S. Stress analysis in plane-strain rotary compression of cylindrical billet // *Journal of JSTP*. – 1977. – № 18. – P. 120-127.
10. Сухоруков С.И. Визначення напружень в заготовці при поперечно-клиновій прокатці // *Вісник ХНУ*. – 2008. – №1. – С. 12-16.
11. Кожевникова Г.В. Влияние напряженного состояния на деформируемость металлов // *Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*. – 2004. – № 1. – С. 53-59.
12. Поперечно-клиновая прокатка в машиностроении / А.И. Целиков, И.И. Казанаская, А.Ф. Сафонов, А.В. Матвеев, Б.Ф. Садковский, В.Я. Шукин; Под ред. А.И. Целикова. – М.: Машиностроение, 1982. – 192 с.
13. Pater Z., Tofil A. Experimental and Theoretical Analysis of the Cross - Wedge Rolling Process in Cold Forming Conditions // *Archives of Metallurgy and Materials*. – 2007. – Vol. 52. – P. 289-297.
14. Yaomin D., Tagavi K.A., Lovell M.R., Zhi Deng Analysis of stress in cross wedge rolling with application to failure // *International Journal of Mechanical Sciences*. – № 42. – 1233-1253.
15. Огородников В.А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении. – Киев: УМК ВО, 1989. – 152 с.

Сухоруков С. И. – аспирант ВНТУ.

ВНТУ – Винницкий национальный технический университет, г. Винница.

visvpi@vstu.vinnica.ua