

**К.В.Баюл, В.И.Петренко**

## **АНАЛИЗ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЯХ БАНДАЖЕЙ ВАЛКОВОГО ПРЕССА**

Проведен анализ контактных напряжений на рабочих поверхностях бандажей валковых прессов. Разработаны расчетные схемы для определения контактных напряжений и показано, что конфигурация формующих элементов и свойства брикетируемой шихты оказывают существенное влияние на величину контактных напряжений и износ рабочих поверхностей бандажей валковых прессов.

**валковый пресс, бандаж, расчетные схемы, контактные напряжения, износ**

**Постановка задачи.** Одним из направлений исследований, выполняемых в Институте черной металлургии НАН Украины, является разработка методов прогнозирования износа бандажей валковых прессов и его влияния на технологические и энергосиловые параметры процесса брикетирования, изучение условий работы пресса при различной степени износа бандажей, поиск и выбор рациональных путей увеличения длительности их эксплуатации. Для решения указанной задачи была принята концепция, являющаяся отправной точкой и научной предпосылкой исследований, разработаны методические подходы и определены аналитические методы исследования изнашиваемости бандажей, оценки работоспособности пресса в этих условиях [1].

Предложенная концепция заключается в установлении взаимосвязей между давлением прессования, нагруженностью (контактными напряжениями, возникающими при взаимодействии шихты с бандажми) и износом бандажей, зависимостей энергосиловых и технологических параметров брикетирования от степени износа. Для ее реализации необходимо создание математических моделей, описывающих эти взаимосвязи.

**Изложение основных материалов исследования.** Наиболее близкими по физической сущности являются известные модели износа прокатных валков [2,3], которые базируются на установленных взаимосвязях между интенсивностью износа, контактными напряжениями и свойствами материала изнашиваемой поверхности [4,5]. Исследования, выполненные авторами работ, указывают на необходимость получения данных о распределении и величине сил, определяющих напряженное состояние и условия разрушения контактных слоев изнашиваемой поверхности. Для применения указанных математических моделей следует учесть особенности механизма взаимодействия прессующих поверхностей бандажей и уплотняемого сыпучего материала.

В процессе брикетирования шихта участвует в силовом контактом взаимодействии с вращающимися навстречу друг другу валками пресса и

совершает при этом относительное перемещение, образуя вместе с каждым из бандажей пару трения. На начальной стадии уплотнения шихты, вследствие неоднородности ее гранулометрического состава и шероховатости рабочих поверхностей бандажей, силовое взаимодействие характеризуется локальностью, т.е. происходит на пятнах фактического контакта. Малые размеры пятен фактического контакта и незначительность их суммарной площади по сравнению с площадью рабочей поверхности бандажа в зоне прессования являются причиной больших фактических давлений на контакте, что приводит к разрушению зерен шихты с одновременным деформированием поверхностных слоев металла бандажей. С ростом величины уплотнения в шихте начинают преобладать пластические деформации, и она приближается по своим свойствам к сплошному телу. Корректность применения гипотезы сплошности при изучении процессов уплотнения мелкофракционных материалов обоснована и подтверждена авторами работ [6–9]. Исходя из этой гипотезы, нами принято допущение, что площадь пятен контактов шихты с бандажом в зоне прессования равна площади участков рабочих поверхностей бандажей, находящихся в силовом взаимодействии с шихтой. Это позволяет при разработке математической модели износа бандажей для определения значений контактных напряжений, возникающих на их рабочих поверхностях, использовать расчетно–аналитический аппарат, представленный в работах [10,11], в которых проведен анализ сил, действующих в очаге деформации. При этом в работе [10] выполнена оценка влияния силовых параметров на прочность бандажей, в качестве критерия оценки принималось условие не разрушения тела бандажа. В данной работе анализ этих сил необходимо выполнить из условия их разрушающего воздействия на рабочие поверхности бандажей за счет деформационных и фрикционных процессов.

Рабочие поверхности бандажей валковых прессов представляют собой сложные пространственные сопряжения. Это определяет неравномерность распределения давления прессования и контактных напряжений в очаге деформации, что приводит к неравномерности износа рабочих поверхностей бандажей. Определение значений контактных напряжений на рабочей поверхности бандажей в трехмерной постановке является достаточно затруднительным. Поэтому в работе для упрощения решения данной задачи рассмотрены два характерных сечения бандажа, которые наиболее полно отражают его геометрические параметры – поперечное и продольное. На рис.1,2 представлены расчетные схемы для двух типов калибровки бандажей валковых прессов (зубчато–желобчатой и линзовидной). Использование предложенных схем позволяет определить распределение и величину контактных напряжений, возникающих на рабочих поверхностях бандажей.

Рассмотрим влияние сил, представленных на расчетных схемах, на взаимодействие рабочих поверхностей бандажей с уплотняемой шихтой. За счет вращения валков силовое взаимодействие бандажей характеризуется периодичностью воздействия давления прессования  $p_1$ ,

$p_2$  на соответствующие участки рабочих поверхностей бандажей. Таким образом, в зоне прессования происходят циклические процессы вдавливания и проскальзывания частиц шихты относительно рабочих поверхностей бандажей, то есть наблюдается многократно повторяющийся пластический сдвиг частиц поверхностного слоя металла бандажей, сопровождаемый его разрыхлением, диспергированием и, соответственно, потерей в процессе движения и массообмена во фрикционном контакте. При этом величина вдавливания определяется как соотношением твердости материала бандажки и частицы, так и величиной нормальных напряжений  $p_{1n}$ ,  $p_{2n}$  на площадке их контакта. Проскальзывание частиц шихты относительно поверхности бандажки определяется величиной касательных напряжений  $p_{1t}$ ,  $p_{2t}$  и напряжений от сил трения  $p_{1\delta\delta}$  и  $p_{2\delta\delta}$ . По аналогии с моделями оценки износа, принятыми в прокатке [12], величину проскальзывания (пути трения) на границе контакта шихты с валками можно охарактеризовать через величину деформации (уплотнения) шихты.

В поперечном сечении очага деформации (рис.1,2) с ростом давления прессования  $p_1$ ,  $p_2$  на контактных поверхностях возрастает величина нормальных  $p_{1n}$ ,  $p_{2n}$  и касательных  $p_{1t}$ ,  $p_{2t}$  напряжений. Соответственно, возрастают значения напряжений от сил трения  $p_{1\delta\delta}$  и  $p_{2\delta\delta}$ , так как они определяются коэффициентом внешнего трения шихты и величиной нормальных контактных напряжений. Величина контактных напряжений, зависит не только от давления прессования, но и от конфигурации формующих элементов, а именно, определяется положением площадки контакта относительно направления действия давления прессования.

Для бандажей с зубчато–желобчатой конфигурацией формующих элементов следует отдельно рассмотреть схему действующих контактных напряжений для ячейки (рис.1а валок 1) и для желоба (рис.1а валок 2). В виду малой величины угла  $\alpha - \beta$  вполне допустимо принять, что  $p_{2n} = p_2$ , а значение ее касательной составляющей  $p_{2t}$  равно нулю, то есть касательные контактные напряжения по дуге прессования в желобе отсутствуют.

Для бандажей с линзовидной конфигурацией формующих элементов (рис.2) значения контактных напряжений для валка 1 и валка 2 по абсолютной величине равны между собой ввиду симметричности калибровки.

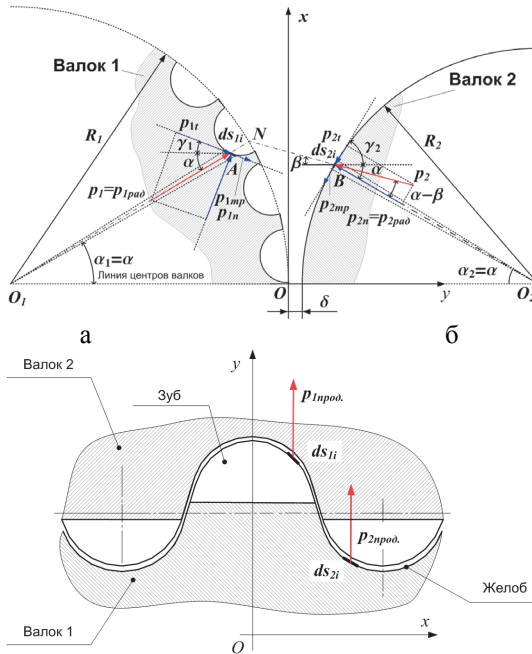


Рис.1. Расчетная схема для определения контактных напряжений, возникающих на рабочих поверхностях бандажей с зубчато–желобчатой конфигурацией формирующих элементов. а – поперечное сечение; б – продольное сечение.

Аналитические выражения для определения  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_{1n}$ ,  $p_{2n}$ ,  $p_{1\delta\delta}$ ,  $p_{2\delta\delta}$ ,  $p_{1l}$  и  $p_{l2}$  приведены в работе [11].

Рассматривая продольные сечения, по аналогии с прокаткой металлических порошков принимаем допущение, что преимущественно шихта движется в направлении, перпендикулярном осям валков, т.е. по направлению их вращения. Тогда деформациями шихты вдоль поверхностей бандажей можем пренебречь. С учетом принятого допущения получаем, что для зубчато–желобчатой конфигурации в продольном сечении бандажей будут действовать контактные напряжения  $p_{1\delta\delta}$ ,  $p_{2\delta\delta}$  (рис.1б,2б), направленные перпендикулярно оси валка. При вращении валков значения  $p_{1\delta\delta}$  и  $p_{2\delta\delta}$  плавно возрастают и, приближаясь к линии центров валков, достигают своего максимума.

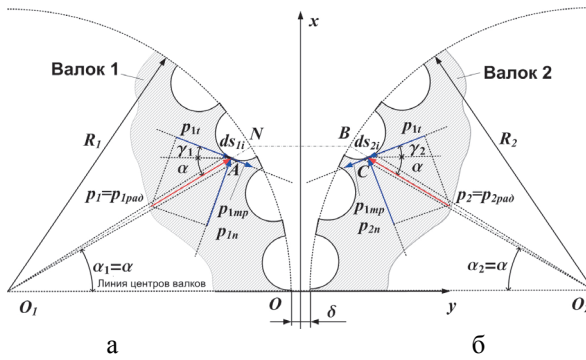


Рис.2. Расчетная схема для определения контактных напряжений, возникающих на рабочих поверхностях бандажей с линзовидной (подушкообразной) конфигурацией формирующих элементов. а – поперечное сечение; б – продольное сечение

Для зубчато–желобчатой конфигурации формирующих элементов в продольном сечении напряжения определяются следующим образом. В окрестности зуба напряжения равны

$$P_{1i\delta i\delta} = P_{1n} \cdot \sin(\alpha + \gamma_1).$$

Величина нормальных контактных напряжений на желобе

$$P_{2i\delta i\delta} = P_2 = P_{2n}.$$

Для линзовидной конфигурации величина контактных напряжений в продольном сечении определяется следующим образом:

$$P_{1i\delta i\delta} = P_{2i\delta i\delta} = P_1.$$

Изменение величины контактных напряжений на рабочей поверхности бандажей наиболее удобно представить графически в виде эпюр. Для этого был использован следующий способ построения эпюр. Для построения эпюр в поперечном сечении очага деформации (рис.3а,4а) рабочая поверхность бандажа представлена в виде набора элементарных контактных площадок  $ds_i$ . Количество контактных площадок на дуге

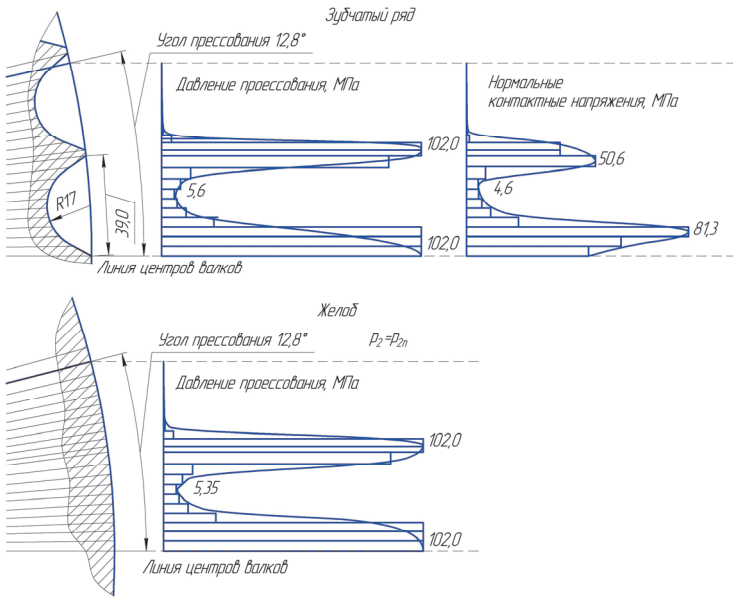
прессования определяется исходя из величины угла прессования, зависящего от коэффициента уплотнения шихты.

Для каждой площадки, на которые разбиты формующие элементы с учетом ее положения в очаге деформации, определяются значения контактных напряжений. В известных математических моделях для определения величины линейного износа используются значения нормальных контактных напряжений, а напряжения от сил трения учтены с помощью различных коэффициентов (в составе которых отражены и коэффициенты трения). Поэтому выполнялось построение эпюр нормальных контактных напряжений  $p_{n1}$ ,  $p_{n2}$  в поперечном сечении и  $p_{1\dot{\alpha}\dot{\alpha}}$ ,  $p_{2\dot{\alpha}\dot{\alpha}}$  – в продольном сечении. Для построения эпюр в продольном сечении (рис.3б,4б) принято, что контактные напряжения распределены равномерно по контуру рабочей поверхности бандажа и их величина определяется исходя из максимальных значений  $p_{1\dot{\alpha}\dot{\alpha}}$  и  $p_{2\dot{\alpha}\dot{\alpha}}$ . Первоначально каждая эпюра строится в виде гистограммы в соответствии с принятой схемой разбиения контура формующего элемента на элементарные площадки. Далее с использованием NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline, нерегулярный рациональный B-сплайн) гистограмма заменяется непрерывной кривой.

На рис.3,4, показаны эпюры контактных напряжений на рабочих поверхностях бандажей с формующими элементами зубчато-желобчатой и линзовидной конфигураций для условий брикетирования шихты, состоящей из 96,5% силикомарганца и 3,5% органического связующего. Как видно из рисунков, при одинаковых максимальных значениях давления прессования (102МПа) величина и распределение нормальных контактных напряжений  $p_{n1}$  и  $p_{n2}$  для зубчато-желобчатых и линзовидных формующих элементов различна. На рабочей поверхности с линзовидными формующими элементами максимальные значения нормальных контактных напряжений меньше, чем для зубчато-желобчатой конфигурации. Следует отметить, что наибольшие значения контактных напряжений как в поперечном, так и в продольном сечениях, наблюдаются на желобе и составляют 102МПа. Таким образом, для зубчато-желобчатой конфигурации формующих элементов на желобе можно выделить локальные участки повышенного износа, характеризующиеся высокими значениями нормальных контактных напряжений.

Анализ эпюр, как по величине, так и по распределению контактных напряжений, показывает, что линзовидная конфигурация формующих элементов имеет более благоприятные условия изнашивания по сравнению с зубчато-желобчатой. На величину и распределение контактных напряжений оказывают влияние свойства брикетируемой шихты., состоящей из 85% коксовой мелочи, 7,5% извести и 7,5% мелассы.

а.



б.

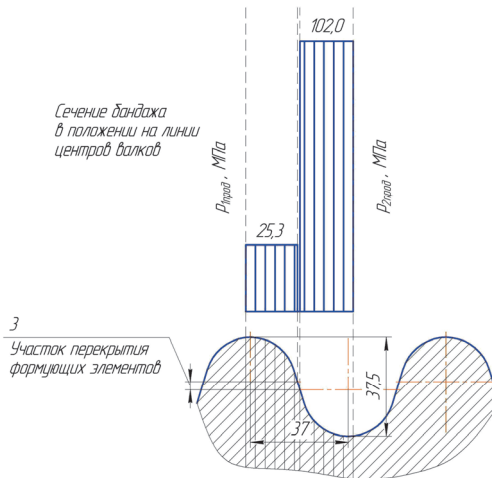
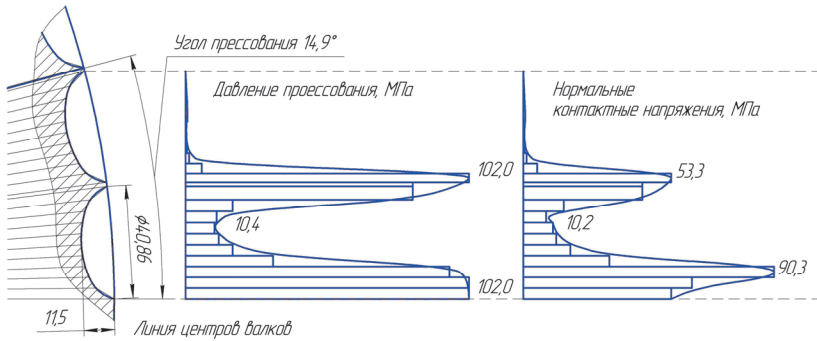


Рис.3.Эпюры контактных напряжений для бандажа с зубчато-желобчатыми формирующими элементами; шихта – 96,5% силикомарганца и 3,5% органического связующего. а – поперечное сечение; б – продольное сечение

На рис.5 представлены эпюры контактных напряжений на рабочих поверхностях бандажей с формирующим элементами зубчато-желобчатой конфигурации для условий брикетирования шихты а.



б.

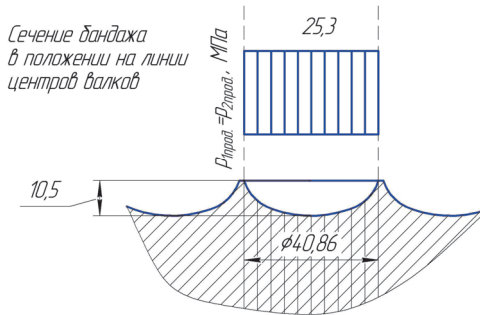


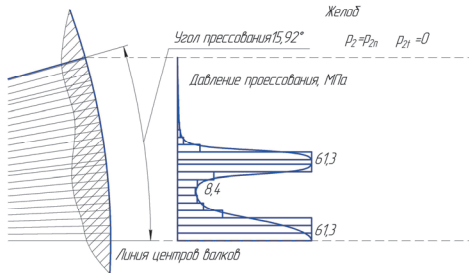
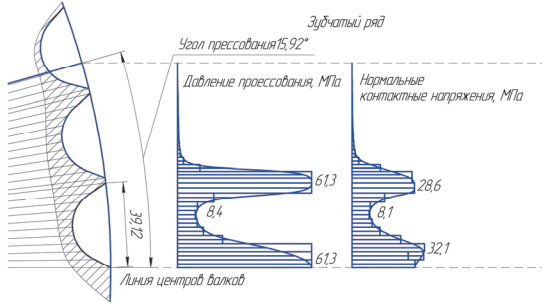
Рис.4.Эпюры контактных напряжений для бандажа с линзовидной конфигурацией формующих элементов; шихта – 96,5% силикомарганца и 3,5% органического связующего. а – поперечное сечение; б – продольное сечение

Шихта на основе силикомарганца имеет большее сопротивление сжатию, чем шихта на основе коксовой мелочи. Как видно из рис.5, при брикетировании шихты на основе коксовой мелочи максимальные значения контактных напряжений меньше, чем при брикетировании шихты на основе силикомарганца, так на зубчатом ряде они не превышают 32,1МПа, а на желобе – 61,3МПа.

Рассмотренные примеры показывают, что на величину и распределение контактных напряжений на рабочих поверхностях бандажей валковых прессов, а соответственно и на износ бандажей существенное влияние оказывают конфигурация формующих элементов и свойства брикетируемой шихты. Построение и анализ эпюр позволяют для конкретных шихт с учетом их свойств прогнозировать величину и характер износа бандажей валковых прессов, а также, выбирая конфигурацию формующих элементов, влиять на условия изнашиваемости бандажей.



а.



б.

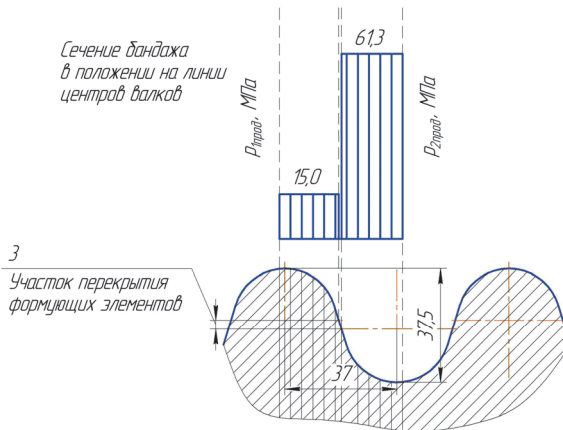


Рис.5.Эпюры контактных напряжений в поперечном сечении бандажа с зубчато-желобчатой конфигурацией формирующих элементов; шихта – 85% коксовой мелочи, 7,5% извести и 7,5% мелассы

а – поперечное сечение;

б – продольное сечение

**Заключение.** Таким образом, на основе выполненного анализа сил, действующих в очаге деформации валкового пресса, разработаны расчетные схемы, аналитическим путем с помощью программных средств определены

контактные напряжения и построены их эпюры. Полученные эпюры дают возможность определить величину и распределение контактных напряжений на рабочих поверхностях бандажей. В дальнейшем выполненные исследования силового взаимодействия бандажей с уплотняемым материалом будут использованы для разработки методов прогнозирования и оценки износа бандажей.

1. *Баюл К.В., Петренко В.И., Маймур Б.Н.* Выбор концепции и методов исследования влияния износа бандажей валковых прессов на технологические и энергосиловые параметры процесса брикетирования // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. — Днепропетровськ: ІЧМ НАН України, 2011. — Вип. 24. — С. 241-246. — Бібліогр.: 5 назв. — рос.*
2. *Воробей С. А.* Прогнозирование износа рабочих валков широкополосного стана горячей прокатки // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. — Днепропетровськ: ІЧМ НАН України, 2006. — Вип. 12. — С. 213-220. — Бібліогр.: 8 назв. — рос.*
3. *Prediction of the wear profile of a roll groove in rod rolling using an incremental form of wear model / D.H.Kim, Y.Lee, S.J.Yoo, W.Y.Choo and B.M.Kim // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture January 1, 2003 vol. 217 no. 1 p. 111-126.*
4. *Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.* Основы расчетов на трение и износ. — М.: Машиностроение, 1977. — 526с.
5. *Archard J. F.* Contacts and rubbing of flat surface. *J. Appl. Phys.*, 1953, 24, 981.
6. *Смирнов В.С., Павлов Н. Н., Виноградов С. Е.* Применение вариационного принципа Лагранжа к задачам обработки давлением металлических порошков. // *Обработка металлов давлением и сварка — Л.: Машиностроение, 1970. — С. 75-78.*
7. *Грин Р.Дж.* Теория пластичности пористых сред // *Механика. — 1973. - №4. — С.109-120.*
8. *Каташинский В.П., Штерн М.Б.* Напряженно-деформированное состояние прокатываемого порошка в зоне уплотнения // *Порошковая металлургия. — 1983. - №11. — С.17-21.*
9. *Моделирование на ЭВМ и исследование процесса прокатки пористых материалов / Г.Я.Гунн, С.А.Стебунов, Д.Ю.Ганелин, А.А.Фролов // Порошковая металлургия. — 1983. - №11. — С.21-26.*
10. *Разработка параметров формующих элементов валковых прессов для брикетирования мелкофракционных металлургических отходов [Текст] [Рукопись]: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук / К.В. Баюл; научн. рук. В.А. Носков; НМетАУ. - Днепропетровск, 2008. - 173 с. - Библиогр.: с. 158-172. - (в пер.) На правах рукописи.*
11. *Баюл К.В.* Аналитическое исследование влияния геометрических параметров формующих элементов валковых прессов на процесс брикетирования // *Порошковая металлургия - 2012. - №3/4. — С.38-49.*
12. *Литовченко Н.В., Заверюха В.Н.* К оценке износа валков станов прокатки тонкой листовой стали // *Изв. ВУЗов. Черная металлургия. — 1966. — № 11. — С.83–86.*

*Статья рекомендована к печати  
академиком НАН Украины В.И.Большаковым*

*К.В.Баюл, В.І.Петренко*

**Аналіз контактних напружень на робочих поверхнях бандажів валкового пресу**

Виконано аналіз контактних напружень на робочих поверхнях бандажів валкових пресів. Розроблено розрахункові схеми для визначення контактних напружень і показано, що конфігурація формуючих елементів і властивості шихти мають істотний вплив на величину контактних напружень і знос робочих поверхонь бандажів валкових пресів.