

напряжений на деформирующем инструменте, напряжённо-деформированное состояние и степень использования ресурса пластичности металла, а также конечные размеры полученных изделий.

2. На основе полученных данных была спроектирована и изготовлена штамповая оснастка, на которой проведено экспериментальное выдавливание полости матрицы для АД в заготовке из стали Р6М5. После выдавливания был выполнен анализ микроструктуры деформированной заготовки. Характер распределения и область проработки соответствует полученным результатам МКЭ распределения интенсивности деформации.

**Список литературы:** 1. *Хыбемяги А.И.* Выдавливание точных заготовок деталей штампов и прессформ / А.И. Хыбемяги., П.С. Лернер; – М.: Машиностроение, 1986. – 150 с. 2. *Пью Х.Л.* Механические свойства материалов под высоким давлением / Под ред. Пью Х.Л. Том 1. – М.: Изд-во «Мир», 1973. – 296 с. 3. *Уральский В. И.* Деформации металлов жидкостью высокого давления / В.И. Уральский, В.С. Плахотин, Н.И. Шефтель и др. – М.: Metallurgija, 1976. – 423 с. 4. *Калюжный В.Л.* Холодное выдавливание ступенчатых полостей прессформ из стали 12ХН3А в условиях действия дифференцированного противодавления на заготовку / В.Л. Калюжный, В.В. Пиманов //Вестник НТУ «ХПИ», Харьков. – 46'2011. С. – 34–41. 5. *Калюжный В.Л.* Холодное выдавливание с дифференцированным противодавлением полостей штампов / В.Л. Калюжный, В.В. Пиманов //Материалы международной научно-технической конференции «Современные технологии обработки материалов давлением: моделирование, проектирование, производство», посвященной 70-летию кафедры «Машины и технологии обработки металлов давлением» им. И.А. Норицына. Москва 2013 г., стр. 29–34.

**Bibliography (transliterated):** 1. Hybemjagi A.I. Vydalivanie tochnyh zagotovok detalej shtampov i pressform A.I. Hybemjagi., P.S. Lerner; – Moscow: Mashinostroenie, 1986. – 150 p. 2. P'ju H.L. Mehanicheskie svojstva materialov pod vysokim davleniem Pod red. P'ju H.L. Tom 1. – Moscow: Izd-vo «Mir», 1973. – 296 p. 3. Ural's'kij V. I. Deformacii metallov zhidkost'ju vysokogo davlenija V.I. Ural's'kij, V.C. Plahotin, N.I. Sheftel' i dr. – Moscow: Metallurgija, 1976. – 423 p. 4. Kaljuzhnyj V.L. Holodnoe vydavlivanie stupenchatyh polostej pressform iz stali 12HN3A v uslovijah dejstvija differencirovannogo protivodavlenija na zagotovku V.L. Kaljuzhnyj, V.V. Pimanov Vestnik NTU «HPI», Kharkov. – 46'2011. P. 34–41. 5. Kaljuzhnyj V.L. Holodnoe vydavlivanie s differencirovannym protivodavleniem polostej shtampov V.L. Kaljuzhnyj, V.V. Pimanov Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Sovremennye tehnologii obrabotki materialov davleniem: modelirovanie, proektirovanie, proizvodstvo», posvjashhennoj 70-letiju kafedry «Mashiny i tehnologii obrabotki metallov davleniem» im. I.A. Noricyna. Moskva 2013g., p. 29–34.

*Поступила (recieved) 30.10.2014*

УДК 621.7.044.2

**С. И. ПЛАНКОВСКИЙ**, докт. техн. наук, проф., НАКУ «ХАИ»;  
**А. А. ПАВЛЕНКО**, ст. преподаватель, НАКУ «ХАИ», Харьков

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАШИНЫ ИМПУЛЬСНОГО БРИКЕТИРОВАНИЯ (МИБ) В ПРОЦЕССЕ ЕЁ ПРОГРЕВА**

Разработана модель прогрева камеры сгорания машины импульсного брикетирования. Определены значения теплового потока, действующего на стенки камеры сгорания при сгорании топливной смеси. Получены зависимости изменения температуры внутренней поверхности камеры от времени

© С. И. Планковский, А. А. Павленко, 2014

работы машины в эксплуатационном диапазоне температур из условия постоянства массы порции горючего газа, подаваемого в камеру сгорания. Построена номограмма для определения давления топливной смеси на конкретном рабочем цикле обеспечивающего стабильность энергии МИБ в эксплуатационном диапазоне температур.

**Ключевые слова:** машина импульсного брикетирования, переработка стружки, брикетирование, конечноэлементная модель, давление топливной смеси, прогрев камеры сгорания.

**Введение.** В последние десятилетия все больше ощущается дефицит кускового металлолома – наиболее просто и дешево перерабатываемого металлургического сырья. В то же время такой ценный продукт как металлическая стружка пользуется невысоким спросом, ввиду достаточно высокой цены её транспортировки и сложностей переработки в исходном состоянии.

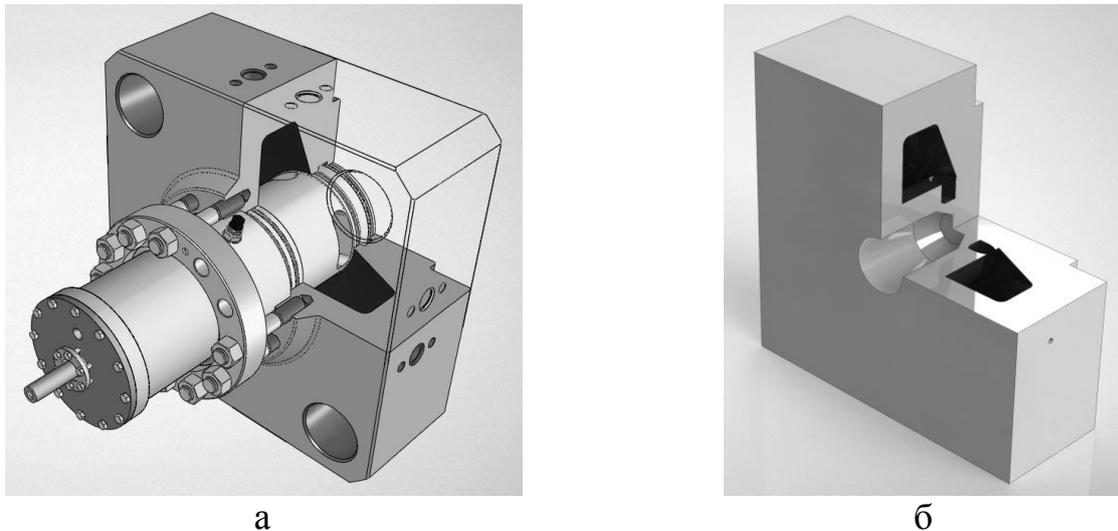
Машины импульсного брикетирования конструкции ХАИ, работающие на газо-воздушной смеси, позволяют эффективно перерабатывать такое ценное металлургическое сырье как отходы металлообработки в плотные, прочные брикеты. Высокая степень автономности, неприхотливость в эксплуатации позволяет устанавливать данное оборудование в непосредственной близости от транспортных магистралей под навесами, достаточными для прикрытия оборудования и стружки лишь от прямого воздействия осадков. Соответственно, оборудование будет работать при температуре окружающей среды. Именно в таких условиях проявляется недостаток, присущий схеме наполнения камеры сгорания, в которой контроль ведется по давлению компонентов смеси.

Известно, что все газы значительно изменяют свой объем под воздействием изменения температуры. При этом масса единицы объема газа остается постоянной величиной. А, следовательно, при одном и том же давлении смеси масса газа, поступившая в камеру сгорания при низкой температуре будет больше, чем поступившая при высокой температуре.

**Целью** предлагаемого исследования является определение длительности прогрева МИБ до рабочей температуры и выработка рекомендаций по стабилизации энергии импульсной брикетировочной машины в указанных условиях.

Головка привода МИБ с камерой сгорания представляет собой сборную конструкцию, использовать которую для моделирования сложно. Все детали конструкции, кроме клапана запирающе-перепускного устройства, соединены неподвижно, имеют плотную посадку и надежно стянуты крепёжными элементами. Это позволяет предположить, что остаточные зазоры между элементами конструкции мало повлияют на теплообмен. Единственный подвижный элемент, установленный с зазором – перепускной клапан – находится внутри конструкции и не контактирует с окружающей средой. Таким

образом можно предположить, что замена сборной модели на монолитную (рис. 1), не приведет к значительным искажениям результатов моделирования.



а

б

Рис. 1 – Головка привода машины импульсного брикетирования: а – реальная конструкция; б – монолитная модель

Для повышения надежности результатов конечноэлементного моделирования за счет улучшения качества расчетной сетки, из модели удалены все отверстия, фаски и скругления. Поскольку все отверстия в собранной импульсной машине заполнены клапанами, сопрягаемыми деталями и крепёжными элементами, считаем такую замену правомерной.

Для построения сетки конечных элементов в расчетных областях использовался программный модуль CFX Mesh. Сетка сгенерирована из тетраэдрических элементов. Поскольку при нагреве отсутствуют области с резким изменением теплофизических характеристик или источники энергии, характерный размер элемента выбирался достаточно большим с целью уменьшения вычислительных затрат. Для оценки качества элементов сетки использовались критерии [1].

В начале определялась величина осредненного по поверхности камеры и по времени теплового потока, возникающего в результате теплообмена сгорающей топливной смеси со стенками камеры. С учетом того, что в этом случае происходит течение реагирующих газов, в системе уравнений Навье-Стокса уравнение сохранения энергии было записано в виде

$$\rho \frac{de}{dt} = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + \sum_{i=1}^N Q^i - Q_{\text{изл}} + P \cdot \text{grad} \vec{u}; \quad (1)$$

а дополнительное уравнение концентрации для определения компонентного состава смеси

$$\rho \frac{\partial c^i}{\partial t} = -\operatorname{div} \vec{I}^i + \dot{S}^i, \quad i=1, \dots, N-1, \quad (2)$$

где:  $Q^i$  – выделение (поглощение) тепла по всем реакциям с образованием  $i$ -той компоненты;  $Q_{\text{изл}}$  – объемное излучение газа;  $S^i$  – массовая скорость образования  $i$ -той компоненты смеси;  $e$  – внутренняя энергия газа.

Массовая скорость образования  $i$ -той компоненты может быть определена суммированием по всем  $K$  реакциям, в которых она участвует:

$$\dot{S}^i = \sum_{m=1}^K m^i (v_{im}'' - v_{im}') \omega_m,$$

где  $\omega_m$  – скорость  $m$ -той химической реакции, а  $v_{im}''$ ,  $v_{im}'$  – стехиометрические коэффициенты  $i$ -той компоненты до и после  $m$ -той реакции.

При исследовании горения использовалась модель конечной скорости химических реакций [2]. Для определения констант прямых и обратных реакций используется температурные зависимости Аррениуса [3].

Величина выделения/поглощения тепла  $Q^i$  для компоненты  $i$  вычисляется как сумма ее производства для всех элементарных реакций с ее участием:

$$Q^i = W^i \sum_{m=1}^K (v_{imi}'' - v_{im}') \omega_m. \quad (3)$$

В соответствии с рекомендациями работы [4] при моделировании использовался механизм горения метана, основанный на полном кинетическом механизме, состоящий из 52 элементарных реакций, включающих 19 реагентов.

Условием остановки расчета в соответствии с данными работы [5] считалось выгорание топлива до величины 85%. В результате расчета для модели камеры МИБ, для начального давления смеси 1,2 МПа за время сгорания топлива было получено значение величины осредненного по внутренней поверхности камеры теплового потока  $10^7$  Вт/м<sup>2</sup>. В соответствии с результатами, полученными в работе [6], величина теплового потока при произвольном давлении смеси для тех же значений температуры стенки может быть пересчитана по формуле  $q_p = q_{p_0} \sqrt{p/p_0}$ . Время выгорания топлива составило 0,218 с. Таким образом, были определены данные, необходимые для моделирования прогрева камеры.

**Начальные и граничные условия для моделирования** процесса прогрева камеры с параметрами, полученными в результате решения предыдущей задачи приведены в таблице. Цикличность работы МИБ

задавалась в соответствии с технической характеристикой – два рабочих цикла в минуту. Температура окружающей среды варьировалась в диапазоне от минус 20° С до +40° С.

Таблица – Условия моделирования для задачи о прогреве камеры

Условия для моделирования	Внутренняя поверхность	Наружная поверхность	Поверхность сопряжения
Начальные условия	$T=T_0$		
Граничные условия	$q - q_{\text{конв}}$	$-q_{\text{конв}} - q_{\text{изл}}$	$T=T_0$
Условие остановки расчета	$t = [t]$		

При моделировании выделялось три участка границы. На внутренней поверхности задавалась периодическое действие равномерно распределенного теплового потока с определенной на первом этапе длительностью и интенсивностью. В остальное время, происходил отвод тепла за счет конвекции. Излучение не учитывалось из-за переизлучения внутренних поверхностей камеры друг на друга. На наружной поверхности камеры происходил отвод тепла конвекцией и излучением, на поверхности сопряжения камеры с конструкцией машины задавалось условие постоянства температуры.

Для задания периодически действующего теплового потока использовалась вспомогательная функция

$$f = \sin^{15}\left(2\pi t / t_{\text{цикла}}\right) - k. \quad (4)$$

Задача расчета температур решалась с переменным шагом по времени так, чтобы на интервале действия нагревающего теплового потока было, по крайней мере, 10 шагов. При остывании камеры шаг по времени увеличивался так, чтобы на интервале между циклами нагрева было не менее 15 шагов по времени. Типовая диаграмма изменения осредненной температуры внутренней поверхности камеры на циклах нагрева–остывания приведена на рис. 2.

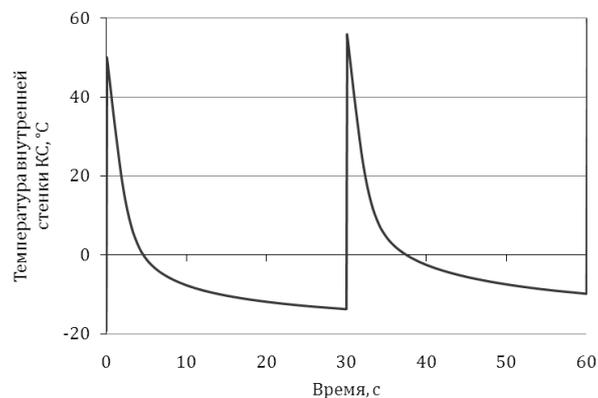


Рис. 2 – Типичная зависимость изменения осредненной температуры внутренней поверхности камеры при работе МИБ

При длительной работе МИБ от цикла к циклу температура камеры сгорания увеличивается до тех пор, пока не выходит на квазистационарный режим (рис. 3), для которого поглощенное за время нагрева тепло сравнивается с отдаваемым за время остывания.

С точки зрения стабилизации энергии камеры основным параметром, получаемым при расчете процесса прогрева камеры МИБ, является температура внутренней стенки камеры при начале наполнения камеры смесью. Характерные зависимости изменения этой температуры приведены на рис. 4.

Анализ изменения приращения температуры стенки от времени (рис. 5) показывает, что независимо от температуры окружающей среды камера МИБ выходит на квазистационарный режим примерно после 120 циклов (60 минут) прогрева.

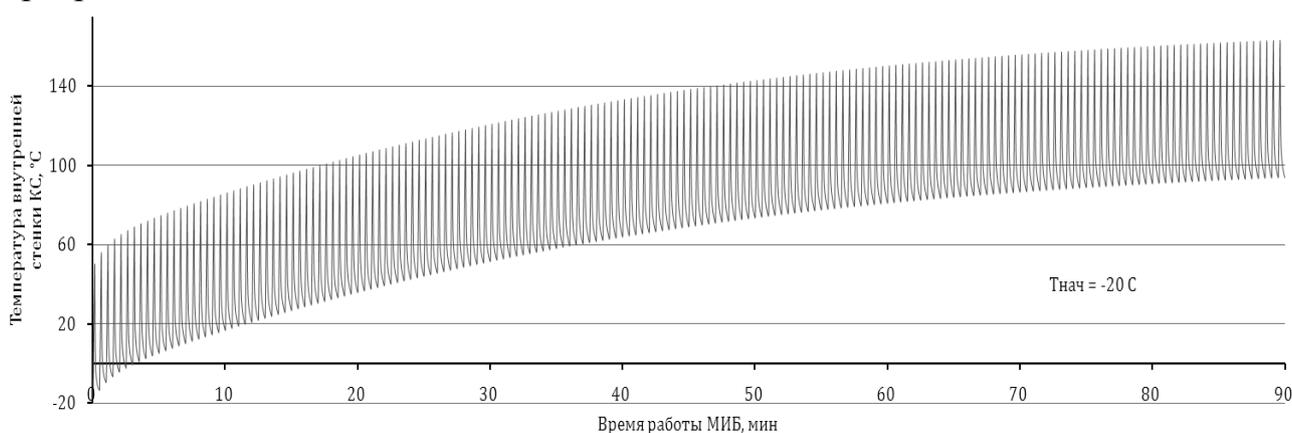


Рис. 3 – Изменения осредненной температуры внутренней поверхности камеры при длительной работе

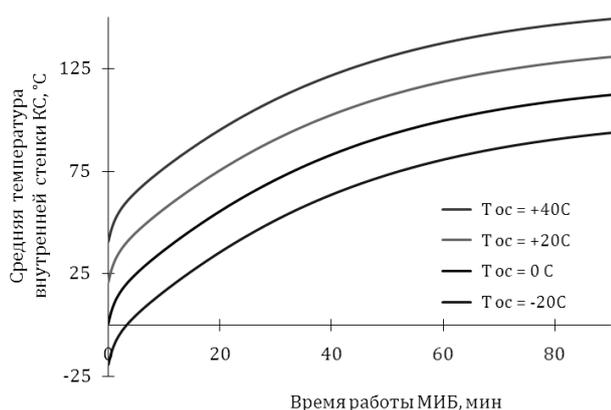


Рис. 4 – Зависимость температуры внутренней поверхности камеры от времени работы

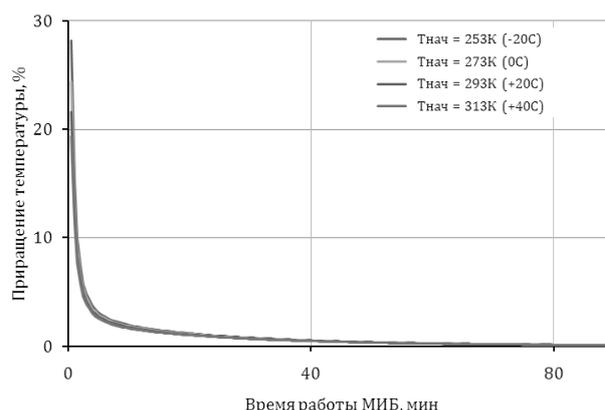


Рис. 5 – Относительное приращение температуры внутренней поверхности камеры сгорания

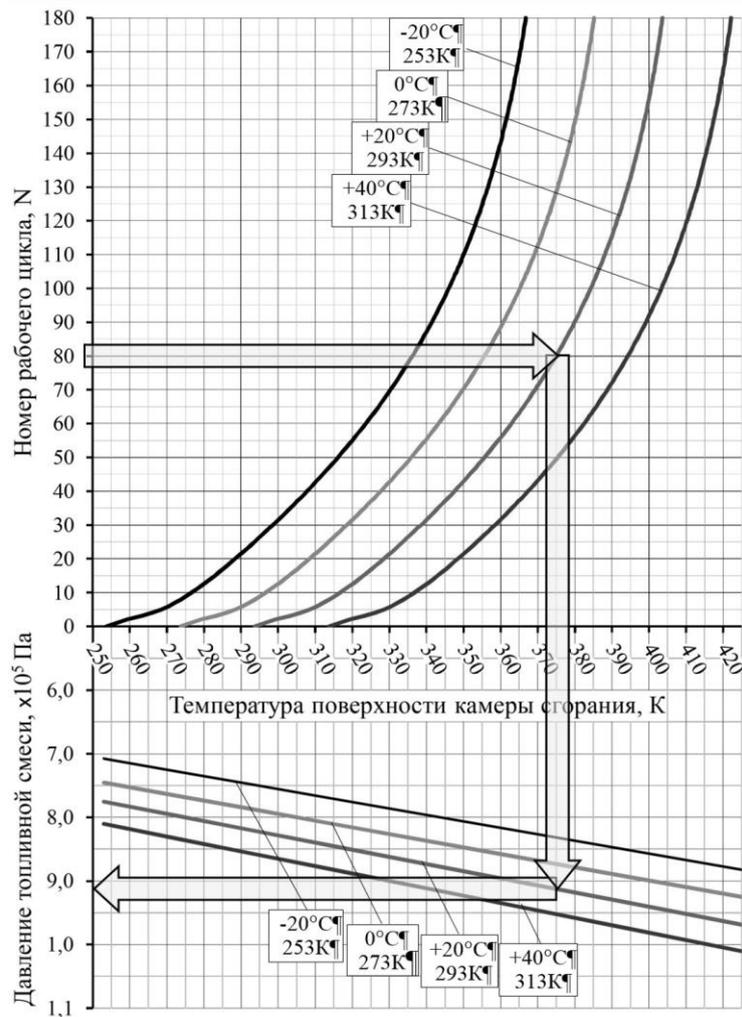


Рис. 6 – Номограмма определения давления топливной смеси на  $i$ -том рабочем цикле в зависимости от температуры окружающей среды и условия постоянства массы порции горючего газа, подаваемого в камеру сгорания брикетировочной машины

Совместное использование полученного ранее графика зависимости давления смеси от температуры стенки камеры при манометрическом контроле наполнения (в предыдущих исследованиях) и зависимости температуры внутренней поверхности камеры сгорания от времени работы МИБ (рис. 6) позволяет получить номограмму для определения давления топливной смеси в зависимости от порядкового номера рабочего цикла и температуры окружающей среды из условия постоянства массы порции горючего газа, подаваемого в камеру сгорания брикетировочной машины (рис. 6). **Выводы.** Исследование процесса наполнения камеры сгорания машины импульсного брикетирования газообразными компонентами топливной смеси подтвердило факт зависимости запасенной энергии от изменения температуры окружающей среды, что соответствует натурным наблюдениям. Установлено, что независимо от температуры окружающей среды, МИБ выходит на

квазистационарний температурний режим примерно после 120 циклов нагрєва. С целью обеспечения постоянного высокого качества брикетов за счет стабилизации подведенной энергии, с помощью предлагаемой расчетной методики разработана номограмма определения начального давления топливной смеси для конкретного рабочего цикла брикетирования в зависимости от температуры окружающей среды.

**Список литературы:** 1. Lewis, R.W. Three-Dimensional Unstructured Mesh Generation: Part 3. Volume Meshes [Текст] / R.W. Lewis, Y. Zheng, D.T. Gethin // Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering. – 1999. – Vol. 134. – P. 285–310. 2. Paik, J.K. CFD simulations of gas explosion and fire actions / J.K. Paik, B. J. Kim, J. S. Jeong etc. // Ships and Offshore Structures – 2010. – vol. 5., issue 1. – P. 3–12. 3. Штиллер, В. Уравнение Аррениуса и неравновесная кинетика [Текст] / В. Штиллер – М.: Мир, 2000. – 176 с. 4. Yungster S. Computation of shock-induced combustion using a detailed methane-air mechanism [Текст] / S. Yungster, M. J. Rabinowitz // Journal of propulsion and power. – 1994. – Vol. 10, No. 5, P. 609–617. 5. Кривцов, В.С. Импульсная резка горячего металла/ В.С. Кривцов, А.Ю. Боташев, А.Н. Застела и др. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2005. – 476 с. 6. Шипуль, О.В. Расчет тепловых потоков при термоимпульсной обработке с форкамерно-факельным поджогом [Текст] / О.В. Шипуль, Е.В. Цегельник, В.Л. Малашенко, С.А. Красовский // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 62. – X., 2013. – С. 89–97.

**Bibliography (translated):** 1. Lewis, R.W. Three-Dimensional Unstructured Mesh Generation: Part 3. Volume Meshes R.W. Lewis, Y. Zheng, D.T. Gethin Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering. – 1999. – Vol. 134. – P. 285 – 310. Print. 2. Paik, J.K. CFD simulations of gas explosion and fire actions J.K. Paik, B. J. Kim, J. S. Jeong etc. Ships and Offshore Structures – 2010. – vol. 5., issue 1. – P. 3-12. Print. 3. Shtiller, V. Urvnenie Arreniusa i neravnovesnaya kinetika V. Shtiller – Moscow: Mir, 2000. – 176. Print. 4. Yungster S. Computation of shock-induced combustion using a detailed methane-air mechanism S. Yungster, M. J. Rabinowitz Journal of propulsion and power. – 1994. – Vol. 10, No. 5, P. 609–617. Print. 5. Krivtsov, V.S. Impulsnaia rezka goriachego metalla V.S. Krivtsov, A.Y. Botashev, A.N. Zastela i dr. – KKharkov: Nat. aerokosm. un-t «Khark. aviatic. in-t», 2005. – 476. Print. 6. Shypul, O.V. Raschet teplovykh potokov pri termoiimpulsnoi obrabotke s forkamerno-fakelnym podzhogom O.V. Shypul, E.V. Tsegelnik, V.L. Malashenko, S.A. Krasovskii Otkrytye informatcionnye i kompiuternye integrirovannye tekhnologii: sb. nauch. tr. Natc. aerokosm. un-ta im. N.E. Zhukovskogo «HAI». – Vyp. 62. – Kh., 2013. – 89–97. Print.

Поступила (recieved) 31.10.2014

УДК 621.771.01

**Р. Я. РОМАНЮК**, канд. техн. наук, ст. викл., ДДТУ;

**А. О. ТОЛОК**, канд. техн. наук, доц., ДДТУ, Дніпродзержинськ

## **СИЛОВА УМОВА СТАЛОСТІ ПРОЦЕСУ ХОЛОДНОЇ ТОНКОЛИСТОВОЇ ПРОКАТКИ**

У роботі проаналізована рівновага сил в осередку деформації при холодній тонколистовій прокатці без врахування натягу. Показано, що поряд з контактними втягуючими та виштовхуючими силами необхідно враховувати і сили, які викликані пластичною деформацією металу. Приведені результати теоретичних досліджень по визначенню граничних умов при тонколистовій прокатці без натягу. Проаналізовані та порівняні відомі умови ведення сталого процесу прокатки. Приведені результати