

УДК 621.762.4.047

Клименко Г. П., Грибков Э. П., Данилюк В. А.

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ ДВУХСЛОЙНЫХ ПОРОШКОВЫХ ЛЕНТ

Существует ряд технологических схем производства порошковых электродов [1, 2], однако одним из недостатков существующих технологий является просыпание порошкового материала из металлической оболочки при транспортировке. Существует технология изготовления порошковых лент, заключающаяся в послойной засыпке компонентов в металлическую оболочку, с предварительным уплотнением предыдущего слоя перед засыпкой последующего [3]. Такой способ обеспечивает более равномерное расположение частиц порошкообразных компонентов по сечению оболочки, увеличивает их количество, снижает пористость сердечника и увеличивает плотность сердечника.

Целью работы является развитие математического аппарата и автоматизированное проектирование технологических режимов процесса прокатки двухслойных порошковых лент.

По аналогии с методикой расчета [4], в основу предлагаемой математической модели прокатки двухслойного порошкового сердечника в металлической оболочке положено численное рекуррентное решение конечно-разностной формы условия статического равновесия каждого отдельного выделенного элементарного объема, полученных путем разбиения зоны пластического формоизменения на их конечное множество. Используемая в этом случае расчетная схема интегрального очага деформации представлена на рис. 1.

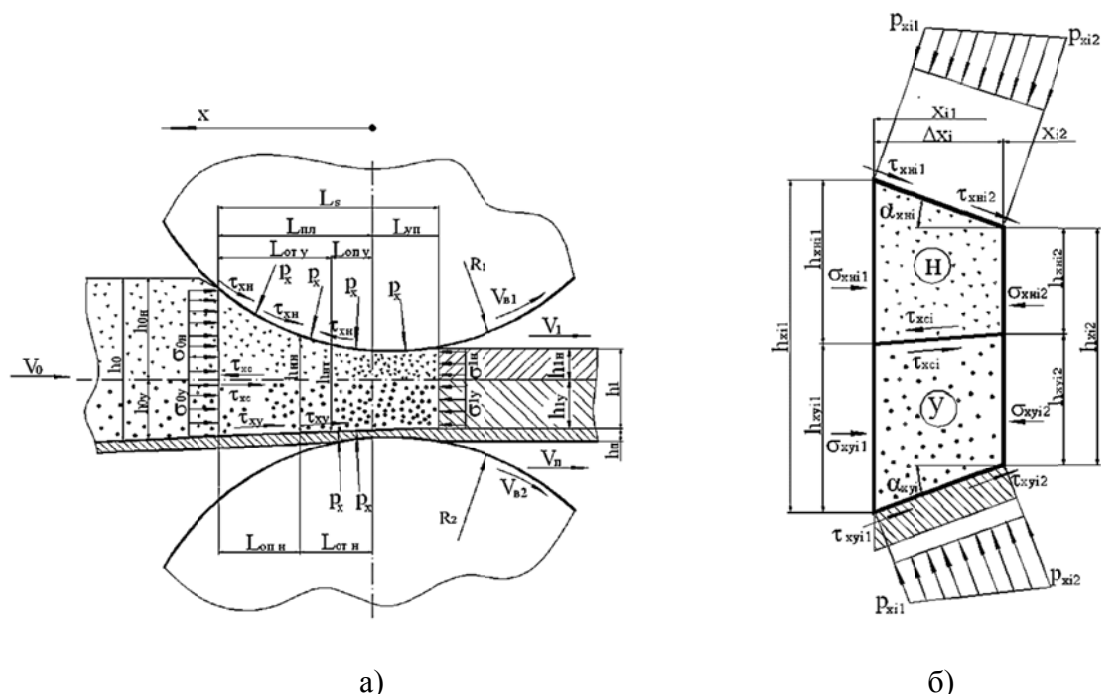


Рис. 1. Расчетная схема очага деформации процесса прокатки двух слоев порошкового материала в металлической оболочке

Данная расчетная схема интегрального очага деформации включает зону уплотнения  $L_{пл}$ , а также зону последующего упругого восстановления  $L_{уп}$ . С точки зрения кинематических соотношений зона уплотнения, в свою очередь, была подразделена на зоны отставания

$L_{om1}$ ,  $L_{om2}$  и зоны опережения  $L_{on1}$ ,  $L_{on2}$ , В связи с возможностью наличия кинематической или геометрической асимметрии процесса прокатки, протяженности указанных зон на ведущем и ведомом валках могут быть не равны между собой.

Полный расчет напряженно-деформированного состояния для  $i$ -го выделенного элементарного объема производится на основе целенаправленного перебора толщин  $h_{xyi2}$ ,  $h_{xni2}$ , исходя из условия равновесия конечного граничного сечения [5–7]:

$$P_{xi2} = P_{xyi2} = P_{xni2}. \quad (1)$$

Для определения нормальных контактных напряжений  $P_{xi2}$  рассмотрим условие статического равновесия элементарного объема очага деформации, которое будет иметь вид [5–7]:

$$\begin{aligned} \Sigma F_{xy(n)i} = & \sigma_{xy(n)i2} h_{xy(n)i2} - \sigma_{xy(n)i1} h_{xy(n)i1} - \frac{1}{2} \Delta x_i (P_{xi1} f_{xy(n)i1} + P_{xy(n)i2} f_{xy(n)i2}) \pm \\ & \pm \frac{1}{2} \Delta x_i f_{xci} (P_{xi1} + P_{xy(n)i2}) + \frac{1}{4} (P_{xi1} + P_{xy(n)i2}) (h_{xi1} - h_{xi2}) \mp \\ & \mp \frac{1}{2} (P_{xi1} + P_{xy(n)i2}) (h_{xy(n)i2} - h_{xy(n)i1}) \mp \frac{1}{2} (h_{xi1} - h_{xi2}) = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где за положительные значения нормальных напряжений  $\sigma_x$  приняты напряжения сжатия. Верхние знаки используют для уплотненной составляющей, а нижние – для неуплотненной композиции.

Следует отметить, что нормальные напряжения  $\sigma_{xyi2}$  и  $\sigma_{xni2}$  можно выразить через соответствующие нормальные контактные напряжения  $P_{xyi2}$  и  $P_{xni2}$ , исходя из условия пластичности для сыпучих сред [8], выразив из которого величину нормальных напряжений  $\sigma_x$  и подставив его в уравнение статического равновесия (2) можно определить нормальные контактные напряжения [5]:

$$P_{xy(n)i2} = \sqrt{\frac{t_{y(n)2}^2 - t_{y(n)4}}{t_{y(n)3} + t_{y(n)1}}}, \quad (3)$$

где коэффициенты:

$$\begin{aligned} t_{y(n)1} = & \mp h_{xy(n)i2} \left( \frac{1 - 2\alpha_{xi2}}{1 + 4\alpha_{xi2}} - \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{2} \left[ \Delta x_i (f_{xci} - f_{xy(n)i2}) \pm h_{xy(n)i1} + h_{xi1} + h_{xi2} \right]; \\ t_{y(n)2} = & \frac{1}{2} P_{xi1} \left[ \Delta x_i (f_{xci} - f_{xy(n)i1}) \mp h_{xi1} + h_{xi2} \pm h_{xy(n)i1} (1 \pm \sigma_{xy(n)i1}) \right]; \\ t_{y(n)3} = & h_{xy(n)i2}^2 \left[ \left( \frac{1 - 2\alpha_{xi2}}{1 + 4\alpha_{xi2}} \right)^2 - 1 \right]; \quad t_{y(n)4} = h_{xy(n)i2}^2 \frac{4}{3} \cdot \frac{1 + \alpha_{xi2}}{1 + 4\alpha_{xi2}} \beta_{xi2} \sigma_{sxi2}^2. \end{aligned} \quad (4)$$

По мере определения  $P_{xyi2}$  и  $P_{xni2}$  конечную толщину  $h_{xni2}$  определяли итерационно исходя из условия (1) [5]:

$$h_{xni2(k+1)} = h_{xni2k} - A_h \cdot \text{sign}(P_{xyi2k} - P_{xni2k}), \quad (5)$$

где в первом цикле  $k$ -ой итерационной процедуры, исходя из первоначального предположения о равенстве вытяжек, принимали  $h_{xni2k}|_{k+1} = \frac{h_{xni1}h_{xi2}}{h_{xi1}}$  ;

$A_h$  – шаг изменения толщины слоя, величина которого в зависимости от степени приближения к исходному результату была принята переменной;

$sign(p_{xyi2k} - p_{xni2k})$  – градиентная оценка направления следующего приращения, соответствующая:

$$sign(p_{xyi2} - p_{xni2}) = \begin{cases} 1 & \text{при } p_{xyi2} > p_{xni2}; \\ 0 & \text{при } p_{xyi2} \approx p_{xni2}; \\ -1 & \text{при } p_{xyi2} < p_{xni2}. \end{cases} \quad (6)$$

Текущие значения относительной плотности порошковых композиций в металлической оболочке определяются аналогично по методике, изложенной в [9].

Переходя к показателям напряженно-деформированного состояния  $i$ -го выделенного элементарного объема для данного случая прокатки (см. рис. 1, б) [10, 11]:

$$\varepsilon_{lxy(n)i2} = \frac{\sigma_{xy(n)i2} \left(1 + 4\alpha_{xy(n)i2}\right) - p_{xy(n)i2} \left(1 - 2\alpha_{xy(n)i2}\right)}{p_{xy(n)i2} \left(1 + 4\alpha_{xy(n)i2}\right) - \sigma_{xy(n)i2} \left(1 - 2\alpha_{xy(n)i2}\right)} \times \frac{h_{xy(n)i1} - h_{xy(n)i2}}{h_{xy(n)i1}}, \quad (7)$$

и, исходя из условия сохранения массы, результирующее в рамках данного объема, значение относительной плотности порошковой среды может быть определено как [10, 11]:

$$\gamma_{xy(n)i2} = \frac{\gamma_{xy(n)i1} h_{xy(n)i1}}{h_{xy(n)i2} (1 + \varepsilon_{lxy(n)i2})}. \quad (8)$$

Для выбора рациональных технологических режимов прокатки помимо всего прочего требуется решение задач оптимизационного характера. Применительно к прокатке композиций на основе порошковых материалов конечной целью процесса будет являться получение проката с заданной плотностью порошковых составляющих и обеспечение требуемых толщин, как всей композиции, так и её компонентов.

В соответствии вышеизложенным, для определения необходимых показателей качества готовой металлопродукции было выполнено автоматизированное проектирование технологических параметров прокатки композиций на основе порошковых материалов. В качестве критериев проектирования при этом были выбраны необходимые значения  $[h_{1T}]$ ,  $[h_{1M}]$ ,  $[\gamma_{1M}]$ . В качестве параметров проектирования –  $h_0$ ,  $h_{0M}/h_{0T}$ . В качестве целевых функций – рассмотренные ранее детерминированные численные математические модели и регрессионные описания. Собственно решение включало внутренний цикл на основе итерационной процедуры по определению  $h_{0M}$  и  $h_{0T}$ , обеспечивающие требуемые результирующие значения  $h_{1T}/h_{1M}$ :

$$(h_{0M} / h_{0m})_{(k+1)} = (h_{0M} / h_{0m})_k + A_{h_{0M} / h_{0m}} sign\{[h_{0M} / h_{0m}] - h_{0M} / h_{0m}\}_k, \quad (9)$$

$$\text{где } sign\{[h_{0M} / h_{0m}] - h_{0M} / h_{0m}\}_k = \begin{cases} +1 & \text{при } ([h_{0M} / h_{0m}] - h_{0M} / h_{0m}) > 0; \\ 0 & \text{при } ([h_{0M} / h_{0m}] - h_{0M} / h_{0m}) \approx 0; \\ -1 & \text{при } ([h_{0M} / h_{0m}] - h_{0M} / h_{0m}) < 0, \end{cases}$$

а также внешний цикл, основанный на итерационном определении  $h_0$ , обеспечивающий требуемое значение  $\gamma_{1M}$ :

$$h_{0(t+1)} = h_{0t} + A_{h0} \operatorname{sign} \{ [\gamma_{1M}] - \gamma_{1t} \}_t, \text{ где } \operatorname{sign} \{ [\gamma_{1M}] - \gamma_{1t} \}_t = \begin{cases} +1 \text{ при } ([\gamma_{1M}] - \gamma_{1t}) > 0; \\ 0 \text{ при } ([\gamma_{1M}] - \gamma_{1t}) = 0; \\ -1 \text{ при } ([\gamma_{1M}] - \gamma_{1t}) < 0. \end{cases} \quad (10)$$

При определении оптимальных исходных параметров был использован метод целенаправленного перебора. В качестве примера на рис. 2 представлены расчетные зависимости, позволяющие определять необходимые значения исходных толщин композиции при заданных относительной плотности порошка и соотношения результирующих толщин составляющих композиции.

Как правило, традиционная прокатка порошковых материалов осуществляется в два этапа: первичная (уплотняющая) прокатка неспеченного материала и вторичная (калибрующая) – после спекания порошков. Такая технологическая схема позволяет снизить энергосиловые параметры процесса при одновременном обеспечении требуемой плотности порошка, что ведет за собой при проектировании оборудования снижение его металлоемкости и повышение качества продукции.

При этом следует отметить, что на качество продукции существенно будут влиять силы прокатки в первом и втором проходах, так как при их неравенстве возникают различные упругие деформации валковых узлов, что приводит к неравномерности распределения давления в проходах и появлению нежелательных краевых эффектов у боковых кромок листа. С другой стороны, обеспечение этого равенства сил в первом и во втором проходах требует решения задач оптимизационного плана.

Данная задача была решена при условии, что межвалковый зазор при втором проходе фиксирован, и перераспределение сил прокатки может быть достигнуто изменением величины межвалкового зазора в первом проходе. Таким образом путем оптимизации находится значение величины межвалкового зазора после первого прохода, при котором выполняется условие  $P_1 = P_2$ . Помимо обеспечения равенства сил прокатки проблема также заключается в обеспечении заданной плотности порошковой составляющей. Решение этой задачи может быть осуществлено путем поиска необходимого значения исходной толщины порошкового слоя.

В соответствии с вышеизложенным автоматизированное проектирование может быть сведено к решению двухпараметрической задачи, в которой в качестве параметров оптимизации служит исходная толщина одной из составляющих композиции и её толщина после первичной прокатки. В качестве критериев оптимизации – конечная толщина и плотность этой составляющей.

Схема решения в данном случае состоит из двух циклов [12]:

– внутренний цикл по определению толщины композиции после первого прохода:

$$h_{1I(t+1)} = h_{1It} + A_h \operatorname{sign} \{ P_I - P_{II} \}; \quad (11)$$

– внешний цикл по определению исходной толщины одной из составляющих композиции:

$$h_{0M(m)(k+1)} = h_{0M(m)k} + A_{h0} \operatorname{sign} \{ \gamma_{1M(m)} - [\gamma_{1M(m)}] \}, \quad (12)$$

где  $t, k$  – номер итерационной процедуры;

$h_{1I}$  – толщина композиции после первого прохода;

$A_h, A_{h0}$  – шаги приращения.

Практически разработанная оптимизационная модель может быть использована при проектировании рабочих клеток специализированных прокатных станов и при выборе технологических режимов.

В качестве примера её численной реализации на рис. 3 представлены расчетные распределения исходных технологических параметров прокатки в зависимости от требуемых результирующих значений толщины композиции  $h_1$  и плотности порошкового слоя  $[\gamma_{1M}]$ .

Полученные зависимости были рассчитаны применительно к прокатке композиции бронзографит- сталь 08кп на специализированном стане П 400.

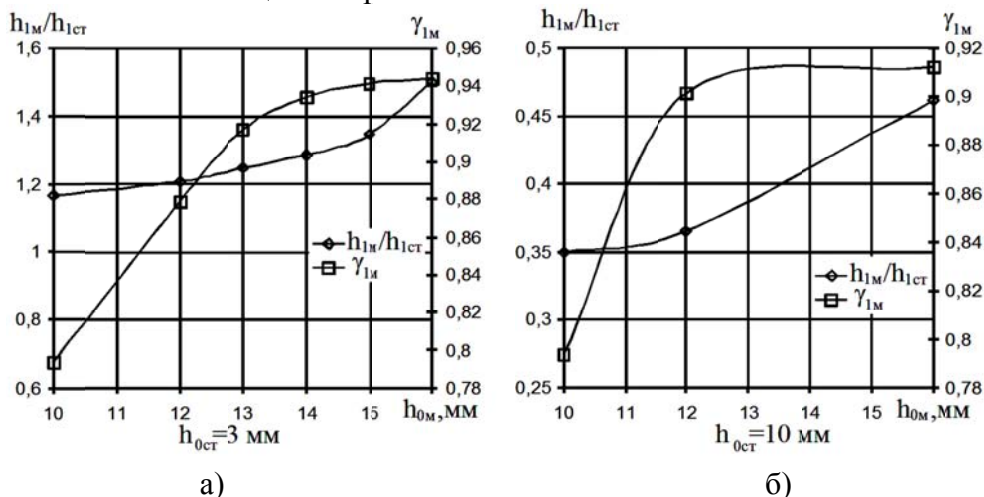


Рис. 2. Расчетные зависимости соотношения конечных толщин составляющих композиции и конечной относительной плотности порошковой составляющей от исходной толщины порошкового слоя для толщины монометалла 3 мм (а) и 10 мм (б):

$$b = 100 \text{ мм}; R_1 = R_2 = 250 \text{ мм}; V_0 = 0.03 \text{ м/с}; a_f = 0.35; a_M = 0.44; m_M = 1; n_M = 2.5; a_1 = 1130.6; a_2 = -1138.9; a_3 = 555.6; \sigma_{SM} = 458 \text{ Н/мм}^2; \sigma_{s0cm} = 240 \text{ Н/мм}^2; f_{0m(M)} = 0.2; \gamma_{0M} = 0.3125$$

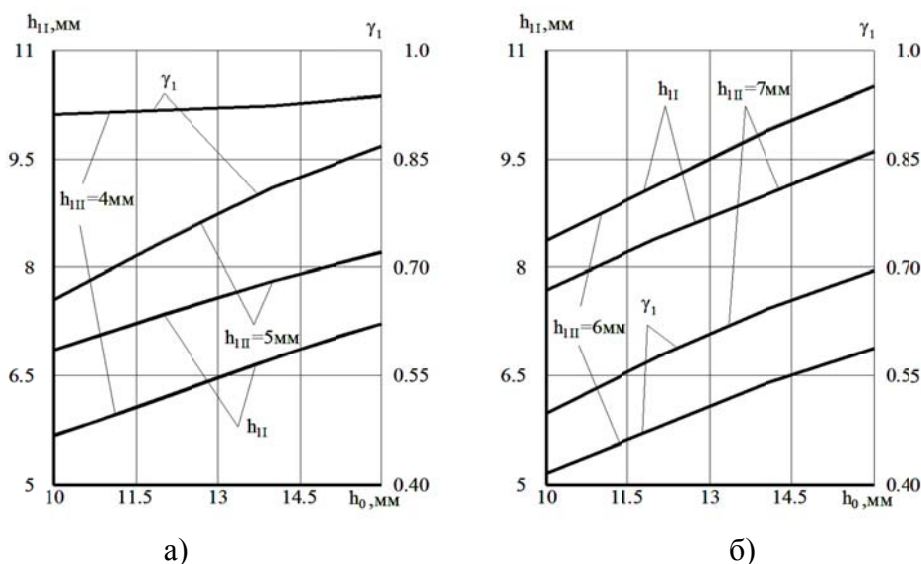


Рис. 3. Расчетные зависимости результирующей толщины композиции после первичной прокатки и конечной относительной плотности порошковой составляющей от исходной и конечной толщины композиции до и после прокатки:

$$b = 100 \text{ мм}; R_1 = R_2 = 250 \text{ мм}; V_0 = 0.03 \text{ м/с}; a_f = 0.35; a_M = 0.44; m_M = 1; n_M = 2.5; a_1 = 1130.6; a_2 = -1138.9; a_3 = 555.6; \sigma_{SM} = 458 \text{ Н/мм}^2; \sigma_{s0cm} = 240 \text{ Н/мм}^2; f_{0m(M)} = 0.2; \gamma_{0M} = 0.3125$$

## ВЫВОДЫ

Получила развитие математическая модель напряженно-деформированного состояния при прокатке двухслойных порошковых лент, отличительной особенностью которой является учет наличия в очаге деформации металлической оболочки, а также определение деформационных характеристик и уровня относительной плотности для каждого из прокатываемых слоев порошковой композиции. В модели также учтена многопроходная схема прокатки, включающая первичную прокатку неспеченного и вторичную прокатку спеченного порошка. На основе данной модели разработана методика по автоматизированному проектированию технологических режимов и конструктивных параметров оборудования для реализации прокатки порошковых лент. Результаты реализации соответствующих методике программных средств позволили определить оптимальные режимы прокатки для заготовок подшипников скольжения на основе бронзографита.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жудра А. П. Износостойкая наплавка порошковыми лентами / А. П. Жудра, А. П. Ворончук // Сварщик. – 2010. – № 6. – С. 6–10.
2. Грибков Э. П. Исследование локальных и интегральных характеристик напряженно-деформированного состояния металла при уплотнении порошкового сердечника в металлической оболочке / Э. П. Грибков, В. А. Данилюк // Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 4 (33). – 310 с. – С. 53–59.
3. Грибков Э. П. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при прокатке порошковых материалов / Э. П. Грибков, Ю. А. Воробьев // Наука, производство, предпринимательство – развитию металлургии Сб. науч. тр. – Донецк, 1998. – С. 151–156.
4. Грибков Э. П., Данилюк В. А. Влияние формы оболочки на геометрические и энергосиловые параметры при прокатке порошковой электродной ленты // Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2013. – №1 (35). – 322 с. – С. 226–233. – ISSN 2076-2151.
5. Грибков Э. П. Математическое моделирование основных показателей качества готовой металлопродукции при прокатке двухслойных порошковых материалов / Э. П. Грибков, И. А. Морозов // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні. – Краматорськ : ДДМА. – 2001. – С. 626–628.
6. Левкин А. Н. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния и геометрических характеристик при реализации процесса прокатки биметаллических порошковых композиций / А. Н. Левкин, Э. П. Грибков, Ю. А. Воробьев // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії. – Краматорськ : ДДМА. – 2000. – С. 360–363.
7. Потапкин В. Ф. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при прокатке композиционных материалов / В. Ф. Потапкин, А. В. Сатонин, Э. П. Грибков // Металлургическая и горнорудная промышленность. Труды V международной науч.-техн. конф. «Теоретичні проблеми прокатного виробництва». – Днепропетровск : НМЕТАУ. – 2000. – С. 72–74.
8. Прогрессивные технологические процессы штамповки деталей из порошков и оборудование / Г. М. Волкогон, А. М. Дмитриев, Е. П. Добряков и др.: Под общ. ред. А. М. Дмитриева, А. Г. Овчинникова. – М. : Машиностроение, 1991. – 320 с.
9. Сатонин А. В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния порошковых материалов при прокатке / А. В. Сатонин, Э. П. Грибков, В. А. Данилюк // Научно-технический прогресс в металлургии – 2012: Материалы междунар. науч. семинара (12 декабря 2012 г.). – Череповец : ЧГУ, 2013. – 154 с. – С. 97–106.
10. Грибков Э. П. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при прокатке порошковых материалов / Э. П. Грибков, Ю. А. Воробьев // Наука, производство, предпринимательство – развитию металлургии. – Донецк : ЛИК. – 1998. – С. 151–156.
11. Одномерное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при прокатке порошковых материалов / В. Ф. Потапкин, А. В. Сатонин, С. М. Романов, В. Ф. Штибен, И. А. Морозов, Ю. А. Воробьев, Э. П. Грибков // Донбас. гос. машиностроит. Академия. – Краматорск, 1996. – 37 с. – Библиогр. : 20 назв. – Рус. – Деп. в УкрИНТЭИ. 25.10.96, № 68 – Ук 96.
12. Романов С. М. Автоматизированное проектирование технологических режимов процесса первичной и вторичной прокатки порошковых материалов / С. М. Романов, Ю. А. Воробьев, Э. П. Грибков // Сб. науч. ст. – Краматорск : ДГМА. – 1998. – № 4. – С. 95–99.

УДК 539.4

Майборода В. С., Налимов Ю. С., Теслюк Н. Н., Майданюк С. В., Пливак А. А.

### МИКРОГЕОМЕТРИЯ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ УСТАЛОСТНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ ПРИ ИХ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ.

Актуальность работы и состояние проблемы исследования. В научно-технической литературе имеется большое количество информации о том, что при повторно-переменном нагружении процесс усталостного разрушения связан с изменениями тонкой структуры материала. Установлено, что этот процесс происходит в результате формирования микротрещин в зонах локального сосредоточения микроповреждений происходящих в результате упрочнения-разупрочнения отдельных локальных микрообъемов материала, расположенных в наиболее нагруженных участках изделий, которые находятся, как правило, вблизи или на поверхности. Формирование подобных локальных зон, в которых идут необратимые изменения субструктуры материала происходит на стадии инкубационного периода усталости [1] и должны сопровождаться определенными внешними проявлениями, связанными с изменениями микрогеометрии поверхности испытываемых деталей. Подобные изменения возможны в результате массового выхода дислокаций в локальных зонах на поверхность материала, коагуляции вакансий в поверхностных зонах, миграции легирующих элементов в результате действия повторно-переменных нагрузок и, как результат, проявлению эффектов экструзии и интрузии [2, 3].

Целью работы является исследование особенностей изменения микрогеометрии рабочих поверхностей образцов, изготовленных из высоколегированного никелевого сплава, в процессе испытаний на усталость в условиях консольного изгиба.

Материалы и методика проведения исследований.

Для проведения указанных исследований использованы образцы с круглым поперечным сечением (рис. 1) изготовленные из жаропрочного никелевого сплава ЧС-70 путем литья заготовок и дальнейшей механической обработки.



Рис. 1. Образец для испытаний на усталость

Испытания на усталость проводили по схеме консольного изгиба (рис. 2) на установке, собранной на основе электродинамического вибратора по методике, описанной в [1].

На первом этапе определяли плоскость колебаний образца, в которой в последующем проводили испытания и измерения микропрофиля поверхности. Испытания образцов выполняли поэтапно при разных величинах знакопеременной нагрузки с симметричным циклом (табл. 1.). После каждого этапа выполняли контроль микропрофиля рабочих поверхностей образца. Контроль шероховатости рабочей поверхности проводили в 6 сечениях в зонах, в которых действовали максимальные напряжения (рис. 3). Запись микропрофиля поверхности в указанных сечениях выполняли на усовершенствованном профилографе на базе Калибр 250 с возможностью записи в цифровом виде.