

УДК 621.762.4.047

Грибков Э. П.

## КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛЮЩЕНИЯ Порошковой проволоки

Порошковые ленты нашли широкое применение в сварочном производстве. Их конструкция представляет металлическую оболочку, которая заполнена порошковым сердечником [1]. Порошок выполняет роль флюса при сварке [2]. Материал оболочки и состав порошка выбирается в зависимости от свариваемых деталей и может быть разнообразным [3-4]. Одним из способов изготовления порошковой ленты является плющение порошковой проволоки в рабочих валках прокатной клети.

Процесс плющения проволоки из сплошных материалов изучен достаточно полно. Определено влияние скорости прокатки, радиуса валков на энергосиловые параметры [5]. Определены геометрические характеристики очага деформации, спрогнозирована ширина получаемых лент и уровень силовых параметров. При этом были использованы как численные [6], так и конечно-элементные модели [7].

Конечно-элементные модели также широко используются при моделировании процессов прокатки порошковых материалов [8, 9]. Данные модели позволяют определить уровни напряжений, деформаций и плотности порошка по всему объему деформируемого тела. При плющении порошковой проволоки наблюдается преимущественное течение материала по ширине заготовки, хотя его деформация носит трехмерный характер и поэтому конечно-элементное моделирование для описания именно этого процесса является наиболее целесообразным.

Несмотря на наличие целого ряда работ, посвященных процессу прокатки порошковых материалов, не решена задача об определении напряженно-деформированного состояния при плющении порошковой проволоки. Не учтено влияние упругой деформации металлической оболочки на энергосиловые параметры процесса. Существующие математические модели плющения проволоки описывают поведение только сплошных сред. Всё это делает актуальной разработку математической модели процесса плющения порошковой проволоки.

Целью работы является исследование влияния исходных параметров заготовки на распределение напряжений, деформаций и плотности порошка при плющении порошковой проволоки на основе создания конечно-элементной модели процесса.

Конечно-элементное моделирование процессов плющения порошковой проволоки было выполнено в системе Abaqus. При моделировании использовалась расчетная схема (рис. 1а), которая представляла собой деформируемую заготовку и два рабочих валка с гладкой бочкой. Заготовка представляла металлическую оболочку со свойствами сплошной среды, заполненную порошковым сердечником из пористого материала (рис. 1б).

Для заготовки производили дискретизацию объема (построение конечно-элементной сетки) на элементарные области (конечные элементы). Для моделирования валков были использованы трехмерные недеформируемые элементы. Для моделирования и порошкового сердечника (рис. 1,в) и металлической оболочки (рис. 1,г) были использованы восьмиузловые линейные, твердотельные редуцированные элементы с контролем разрушения C3D8R [10].

При моделировании были использованы следующие граничные условия: валки имели одну вращательную степень свободы и угловую скорость вращения равную 1 рад/с. Контакт между заготовкой и валками задавался при помощи модели контакта «Поверхность к поверхности» с коэффициентом трения равным 0,2.

Моделирование было выполнено для следующих исходных параметров:

- диаметр валков – 100 мм;
- внешний диаметр оболочки – 3,2 мм;
- толщина оболочки – 0,6 мм;
- материал оболочки – сталь 08 кп;
- материал порошкового сердечника – железный порошок марки ПЖ4М2;
- межвалковый зазор – 3,13; 2,83; 2,66; 2,5 мм.

Для оценки полученных результатов выходными параметрами были выбраны проекции реакций в контрольных точках валков в глобальной системе координат, а также деформации и напряжения в узлах конечных элементов плющеной заготовки, а также распределения пористости порошкового сердечника (рис. 2).

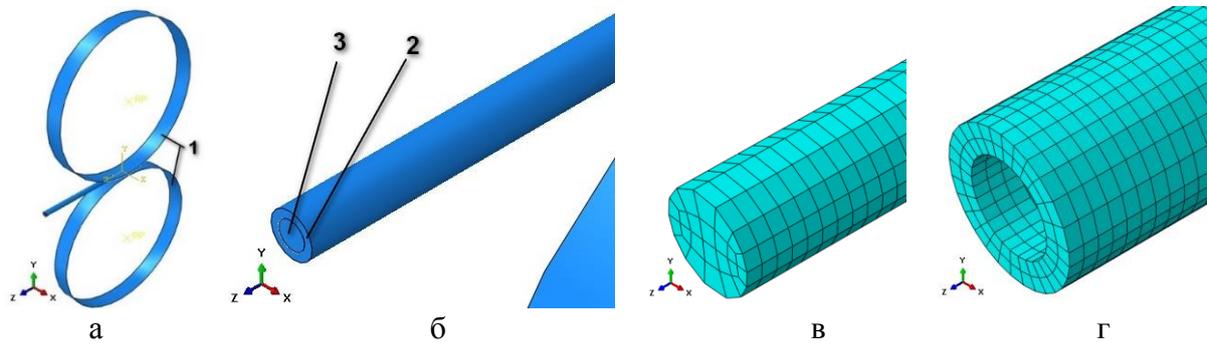


Рис. 1. Конечно-элементная модель процесса плющения порошковой проволоки (1 – рабочие валки; 2 – металлическая оболочка; 3 – порошковый сердечник):

а – расчетная схема; б – заготовка; в – конечно-элементная сетка порошкового сердечника; г – конечно-элементная сетка металлической оболочки

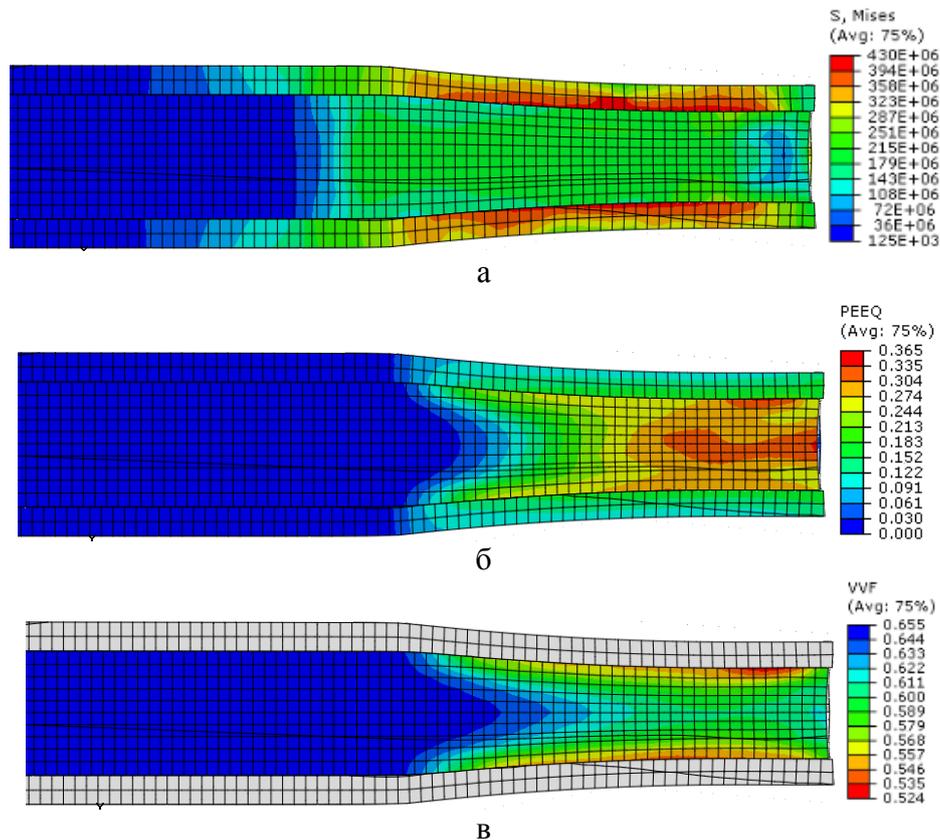


Рис. 2. Распределение эквивалентных напряжений (а), деформаций (б) и пористости (в) при плющении порошковой проволоки

На рис. 3 представлены поля распределений эквивалентных деформаций по сечению плющеной ленты. Из анализа представленных результатов видно, что наиболее равномерная деформация порошкового сердечника наблюдается при больших обжатиях. При малых обжатиях недеформированными остаются боковые кромки заготовки, что снижает их эксплуатационные свойства.

На рис. 4 представлены расчетные распределения силы и момента прокатки по времени. Анализ данных зависимостей показывает плавное нарастание энергосиловых параметров по мере заполнения очага деформации, что говорит о стабильности процесса. Максимальные значения силы прокатки представлены в табл. 1.

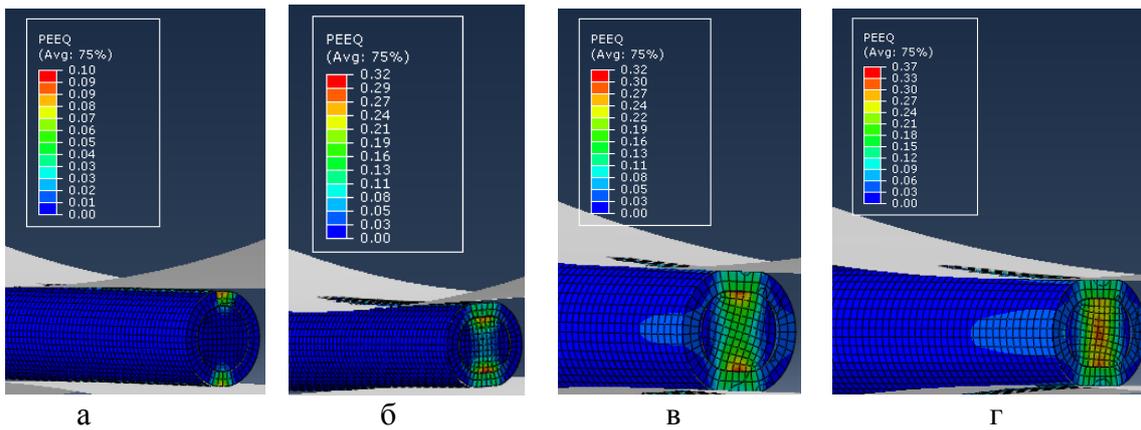


Рис. 3. Распределение эквивалентных деформаций при плющении порошковой ленты толщиной  $h$ :

а –  $h=3,13$  мм; б –  $h=2,83$  мм; в –  $h=2,66$  мм; г –  $h=2,5$  мм

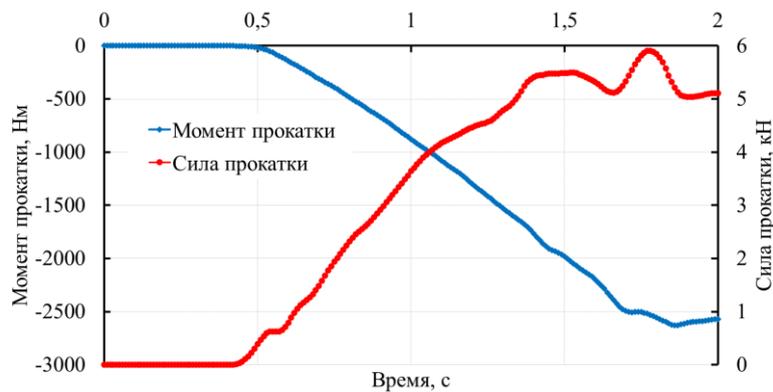


Рис. 4. Распределение силы и момента прокатки при плющении порошковой проволоки

Для проверки правомерности разработанной конечной элементной модели в таблице 1 представлено сравнение результатов расчета с аналитической моделью [11]. Из анализа полученных значений силы прокатки видно, что погрешность расчета не превысила 10%, что говорит о достаточной точности расчета и правомерности принятых допущений.

Таблица 1

Сопоставление результатов расчета аналитической и конечно-элементной моделей

№ опыта	Диаметр проволоки, мм	Толщина ленты, мм	Ширина ленты, мм	Сила прокатки, Н		Погрешность расчета %
				Аналитическая модель	Конечно-элементная модель	
1	3,2	3,13	3,33	560	514	8,95
2	3,2	2,83	3,72	1545	1700	9,12
3	3,2	2,66	3,8	1965	2096	6,25
4	3,2	2,5	4,1	2341	2600	9,96

## ВЫВОДЫ

Теоретические исследования процесса плющения порошковой проволоки на основе разработанной конечно-элементной модели показали равномерность распределения напряжений, деформаций и плотности порошка в объеме очага деформации. Из анализа представленных результатов показано, что наиболее равномерная деформация порошкового сердечника наблюдается при больших обжатиях. При малых обжатиях недеформированными остаются боковые кромки заготовки, что снижает их эксплуатационные свойства. Адекватность модели проверена на основе

сравнения результатов расчета с аналитической моделью, при этом погрешность расчета силы прокатки не превысила 10%, что говорит о достаточной точности расчета и правомерности принятых допущений. Предложенная модель может быть использована для анализа распределения напряжений и деформаций в объеме очага деформации.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наплавка быстроизнашивающихся деталей самозащитными порошковыми лентами / Б.В. Данильченко [и др.]. // *Автоматическая сварка*. – 1989. – № 5. – С. 38–41.
2. Ramakrishnan M. Application of submerged arc welding technology with cold wire addition for drum shell long seam butt welds of pressure vessel components / M. Ramakrishnan, V. Muthupandi // *Int J Adv Manuf Technol*. – 2013. – No. 65 (5-8): pp. 945-956. – doi: 10.1007/s00170-012-4230-0.
3. Новое оборудование для наплавки конусов и чаши засыпных аппаратов / А. П. Жудра, А. П. Ворончук, А. А. Фомакин, С. И. Великий // *Автоматическая сварка*. – 2009. – № 9. – С. 57–59.
4. Жудра А. П. Износостойкая наплавка порошковыми лентами / А. П. Жудра, А. П. Ворончук // *Сварщик*. – 2010. – № 6. – С. 6–10.
5. Kazeminezhad M. An experimental investigation on the deformation behavior during wire flat rolling process / M. Kazeminezhad, Taheri A. Karimi // *J. Mater. Process Tech.* – 2005. – No. 160(3): pp. 313-320. – doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.06.020.
6. Lambiase F. Experimental and Finite Element Investigation of Roll Drawing Process / F. Lambiase, Ilio A. Di // *J. Mater. Eng. Perform.* – 2012. – No 21(2). – pp. 161-166. – doi:10.1007/s11665-011-9932-1.
7. Vallellano C. Analysis of deformations and stresses in flat rolling of wire / C. Vallellano, P. A. Cabanillas, F. J. Garcia-Lomas // *J Mater Process Tech.* – 2008. – No. 195(1-3): pp. 63-71. – doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.04.124.
8. Mori K. Analysis of the forming process of sintered powder metals by rigid-plastic finite-element method / K. Mori, K. Osakada // *Int. J. Mech. Sci.* – 1987. – No. 29(4): pp. 229-238. – doi: 10.1016/0020-7403(87)90037-3.
9. Zheng Z.-X. Experimental and numerical modeling for powder rolling / Z.-X. Zheng, W. Xia, Z. Y. Zhou // *Rev. Adv. Mater. Sci.* – 2013. – No. 33: pp. 330-336. [http://www.ipme.ru/e-journals/RAMS/no\\_43313/05\\_433\\_zheng.pdf](http://www.ipme.ru/e-journals/RAMS/no_43313/05_433_zheng.pdf)
10. Манилык Т. Практическое применение программного комплекса АВАQUS в инженерных задачах. Версия 6.5 / Т. Манилык, К. Ильин. – М.: МФТИ, ТЕСИС, 2006. – 99 с.
11. Грибков Э. П. Математическое моделирование процесса плющения порошковой проволоки / Э.П. Грибков // *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. – Краматорск: ДГМА, 2015. – № 2 (41). – С. 96–102.

### REFERENCES

1. Naplavka bystroiznashivajushhihsja detalej samozashhitnymi poroshkovymi lentami / B.V. Danil'chenko [i dr.]. // *Avtomaticheskaja svarka*. – 1989. – № 5. – S. 38–41.
2. Ramakrishnan M. Application of submerged arc welding technology with cold wire addition for drum shell long seam butt welds of pressure vessel components / M. Ramakrishnan, V. Muthupandi // *Int J Adv Manuf Technol*. – 2013. – No. 65 (5-8): pp. 945-956. – doi: 10.1007/s00170-012-4230-0.
3. Novoe oborudovanie dlja naplavki konusov i chash zasypnyh apparatov / A. P. Zhudra, A. P. Voronchuk, A. A. Fomakin, S. I. Velikij // *Avtomaticheskaja svarka*. – 2009. – № 9. – S. 57–59.
4. Zhudra A. P. Iznosostojkaja naplavka poroshkovymi lentami / A. P. Zhudra, A. P. Voronchuk // *Svarshhik*. – 2010. – № 6. – S. 6–10.
5. Kazeminezhad M. An experimental investigation on the deformation behavior during wire flat rolling process / M. Kazeminezhad, Taheri A. Karimi // *J. Mater. Process Tech.* – 2005. – No. 160(3): pp. 313-320. – doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.06.020.
6. Lambiase F. Experimental and Finite Element Investigation of Roll Drawing Process / F. Lambiase, Ilio A. Di // *J. Mater. Eng. Perform.* – 2012. – No 21(2). – pp. 161-166. – doi:10.1007/s11665-011-9932-1.
7. Vallellano C. Analysis of deformations and stresses in flat rolling of wire / C. Vallellano, P. A. Cabanillas, F. J. Garcia-Lomas // *J Mater Process Tech.* – 2008. – No. 195(1-3): pp. 63-71. – doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.04.124.
8. Mori K. Analysis of the forming process of sintered powder metals by rigid-plastic finite-element method / K. Mori, K. Osakada // *Int. J. Mech. Sci.* – 1987. – No. 29(4): pp. 229-238. – doi: 10.1016/0020-7403(87)90037-3.
9. Zheng Z.-X. Experimental and numerical modeling for powder rolling / Z.-X. Zheng, W. Xia, Z. Y. Zhou // *Rev. Adv. Mater. Sci.* – 2013. – No. 33: pp. 330-336. [http://www.ipme.ru/e-journals/RAMS/no\\_43313/05\\_433\\_zheng.pdf](http://www.ipme.ru/e-journals/RAMS/no_43313/05_433_zheng.pdf)
10. Manilyk T. Prakticheskoe primenenie programmnoho kompleksa ABAQUS v inzhenernyh zadachah. Versija 6.5 / T. Manilyk, K. Il'in. – M.: MFTI, TESIS, 2006. – 99 s.
11. Gribkov Je. P. Matematicheskoe modelirovanie processa pljushhenija poroshkovoju provoloki / Je.P. Gribkov // *Obrabotka materialov davleniem: sbornik nauchnyh trudov*. – Kramatorsk: DGMA, 2015. – № 2 (41). – S. 96–102.

Грибков Э. П. – канд. техн. наук, доц. ДГМА

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: [amm@dgma.donetsk.ua](mailto:amm@dgma.donetsk.ua)

Статья поступила в редакцию 20.03.2016 г.