

УДК 621.791.95

Кассов В. Д.
Грибков Э. П.
Грибкова С. Н.
Бережная Е. В.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕДРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ОБОЛОЧКУ ПРИ ПРОКАТКЕ ПОРОШКОВЫХ ЛЕНТ

Процесс наплавки – широко применяемая в современном машиностроении технология, обладающая рядом неоспоримых преимуществ. Это прежде всего, придание уникальных требуемых свойств поверхностям отдельных деталей, а в дальнейшем и самим машинам, что естественно приводит к улучшению качественных и технико-экономических показателей изделий, и в конечном итоге, к увеличению их конкурентоспособности, как на отечественном, так и на мировом рынках. Что является весьма актуальной проблемой для отдельных предприятий и всей экономики Украины. Помимо этого, наплавка весьма качественно и экономно позволяет восстанавливать дорогостоящие габаритные детали, минуя обработку резанием и сопровождающие ее потери металла [1–4].

При изготовлении наплавочных электродов (порошковых лент), для придания наплавочному материалу особых свойств, (чаще всего прочностных), используют порошковый сердечник из тугоплавких карбидов металлов (титан, вольфрам, ванадий, кремний, цирконий и др.) заключенный в металлическую пластичную оболочку из ленты толщиной 0,1...1,0 мм. Частицы сердечника часто имеют осколочную форму, что в соединении с их высокой прочностью, может приводить к нарушению целостности более мягкой оболочки в процессе уплотнения порошка при обработке давлением [1, 4].

Целью работы является установление зависимости глубины внедрения частиц в металлическую оболочку от давления при прокатке порошковых лент.

В основу исследования положено конечно-элементное моделирование процессов внедрения недеформируемого тела в жесткопластическое пространство в системе Abaqus CAE.

Задачу по определению вероятности нарушения целостности оболочки ленты решали путем анализа внедрения частиц различной формы в горизонтальную плоскость.

Рассматриваемая модель была основана на допущении об ориентации частицы по нормали к внедряемой поверхности. Сила внедрения частицы определялась через максимальные значения нормальных контактных напряжений, возникающих в очаге деформации при прокатке порошковых лент [5–7]. То есть, при моделировании просчитывался самый неблагоприятный вариант с точки зрения сохранения целостности оболочки.

При моделировании использовалась расчетная схема (рис. 1), которая представляла собой частицу 2, внедряемую в пластичную поверхность 1. Принято, что частица 2 является недеформируемой благодаря ее более высоким прочностным свойствам, а ее форма может быть сферической (рис. 1, а) или клиновой (рис. 1, б) с переменной величиной образующего угла при вершине α .

Для деформируемой поверхности 1 производили дискретизацию объема (построение конечно-элементной сетки) на элементарные области (конечные элементы) (см. рис. 1). Для моделирования частицы 2 были использованы недеформируемые элементы [8].

Скорость внедрения недеформируемой частицы задана на уровне 1 мм/с. Контакт между частицей и оболочкой задавался при помощи модели контакта «Поверхность к поверхности» с коэффициентом трения равным 0,1.

В результате реализации конечно-элементной модели в системе Abaqus были получены поля распределения эквивалентных напряжений и деформаций по сечению пластичной оболочки (рис. 2, 3).

Частица в форме шара \varnothing 1 мм (рис. 2) внедрялась на глубину 0,65 мм (при дальнейшем внедрении фиксировалось разрушение) с учетом упрочнения материала оболочки и без него.

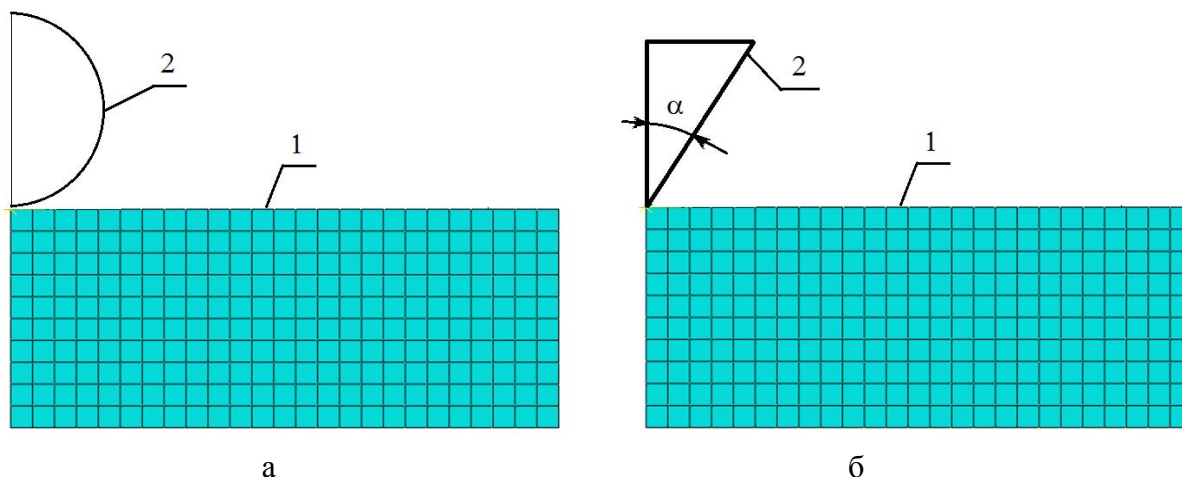


Рис. 1. Конечно-элементная модель процесса внедрения в поверхность пластичной оболочки 1 порошковой частицы 2 имеющей форму:
а – шара; б – клина

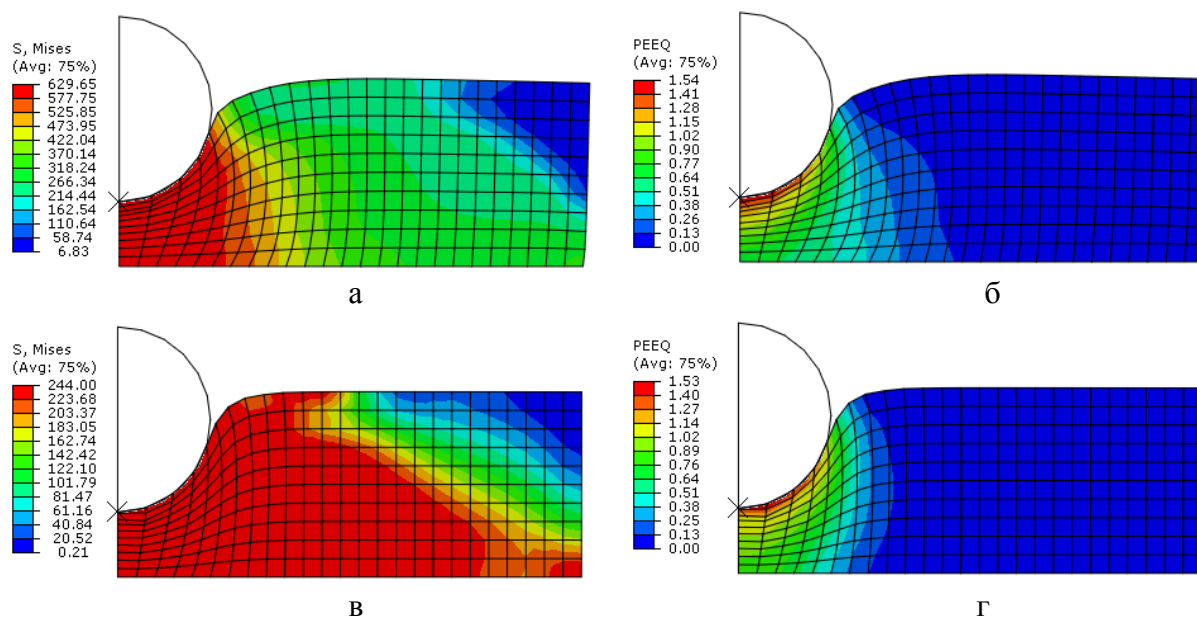


Рис. 2. Поля распределений эквивалентных напряжений (а, в) и деформаций (б, г) при внедрении частицы в форме шара на глубину 0,65 мм с учетом (а, б) и без учета (в, г) упрочнения материала

Частица в форме клина (рис. 3) с переменной величиной образующего угла α при вершине внедрялась на глубину 1 мм.

На рис. 4 в качестве результатов численной реализации приведены расчетные зависимости глубины внедрения частиц порошкового сердечника различной формы от величины давления при прокатке порошковой ленты.

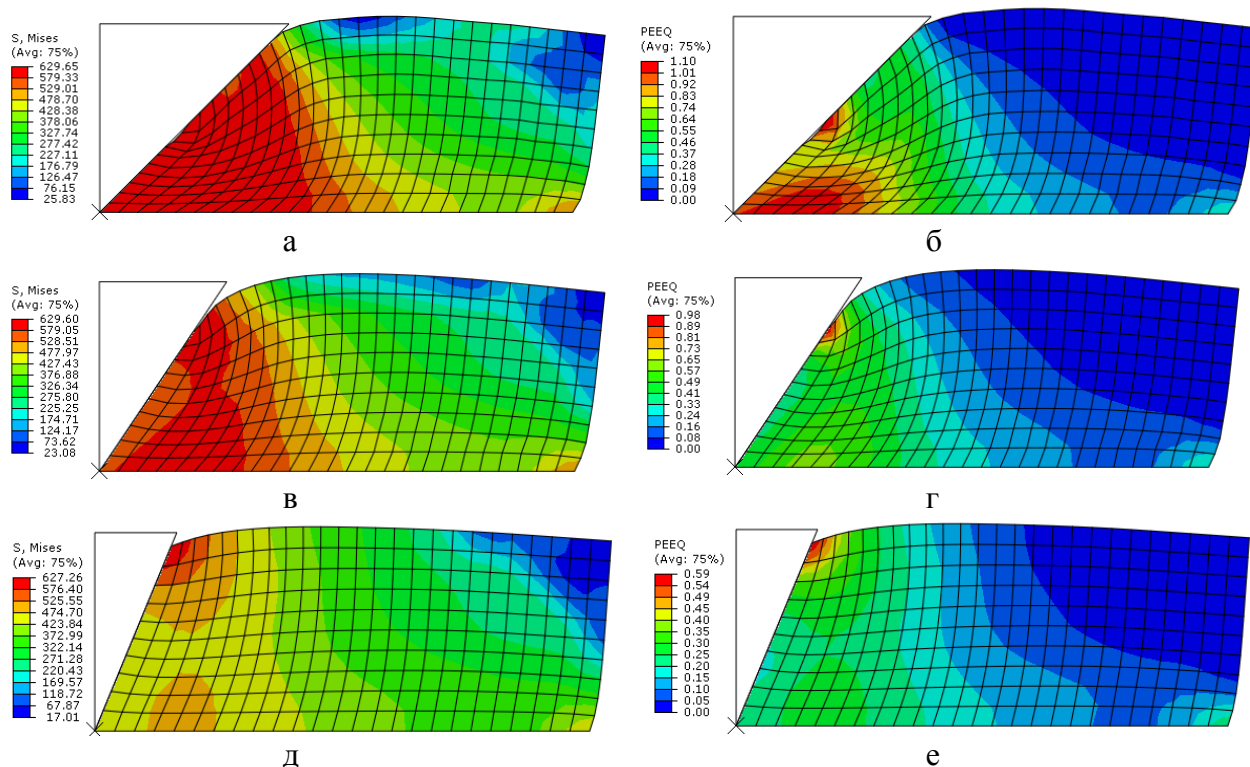


Рис. 3. Поля распределений эквивалентных напряжений (а, в, д) и деформаций (б, г, е) при изменении образующего угла вершины клина:

а, б – при $\alpha = 90^\circ$, в, г – при $\alpha = 68^\circ$, д, е – при $\alpha = 45^\circ$

Анализ результатов расчёта (рис. 4.) показал, что

– с увеличением угла наклона образующей клина α глубина внедрения уменьшается при постоянной величине давления на поверхности частицы. т.е. чем более остроконечная форма частицы, тем проще ей нарушить целостность оболочки; Так, например, при увеличении угла α с 45° до 90° глубина внедрения частицы уменьшается с 0,87 до 0,75 мм при давлении 600 МПа;

– при увеличении и максимальных контактных напряжений процесса прокатки порошковой ленты глубина внедрения частицы сердечника в оболочку возрастает при любой форме частицы; так, например, при увеличении давления с 500 до 600 МПа глубина внедрения частицы в форме клина с углом наклона образующей $\alpha = 45^\circ$ увеличится с 0,73 до 0,87 мм.

– наибольшая глубина внедрения наблюдается при использовании частиц в форме клина и наименьшая величина внедрения – при использовании шарообразных частиц сердечника.

Для сравнения результаты конечно-элементного моделирования были сопоставлены с результатами, полученными ранее в работе [9] на основе метода полей линий скольжения. Для этого было принято допущение об отсутствии упрочнения материала оболочки. Анализ полученных результатов показал, что результаты конечно-элементного моделирования и полученные на основе метода полей линий скольжения сопоставимы на глубине внедрения частицы на уровне от 40% и выше толщины оболочки, т.е. в диапазоне разрушения оболочки. На меньших глубинах внедрения метод полей линий скольжения дает завышенные результаты с погрешностью до 50%. В тоже время пренебрежение упрочнением материала оболочки дает опять же завышенные результаты.

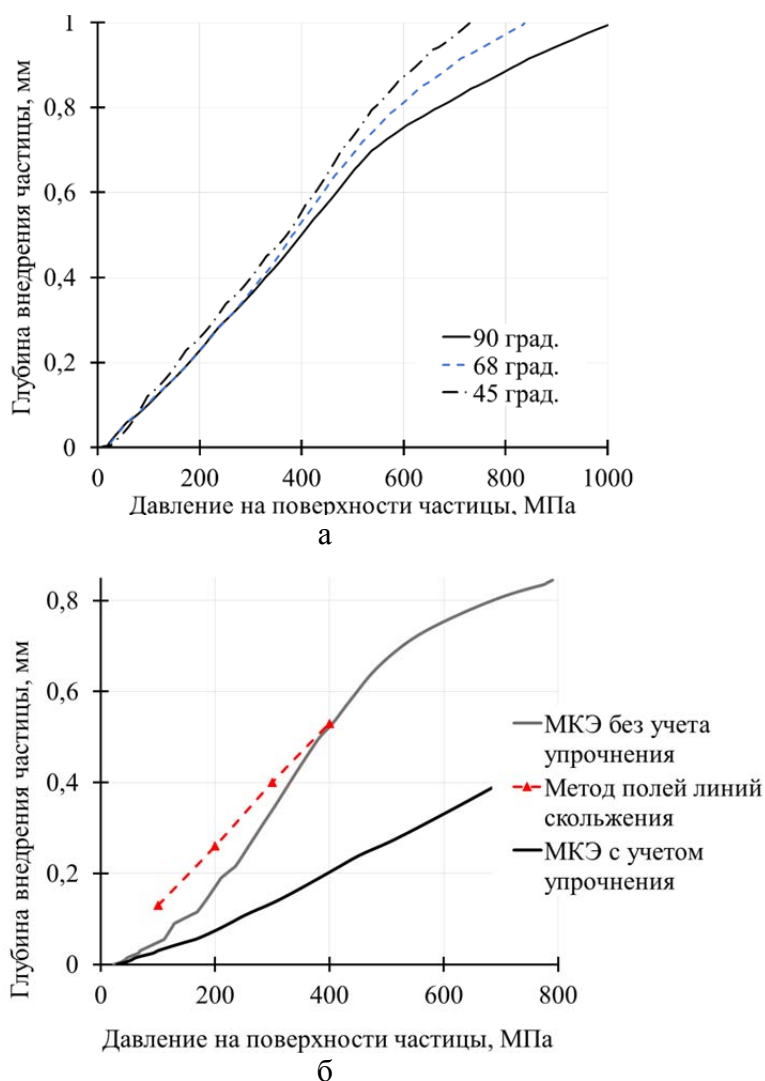


Рис. 4. Расчетные зависимости глубины внедрения частиц порошкового сердечника различной формы от величины давления при прокатке порошковой ленты:
а – частица в форме клина, б – частица в форме шара

ВЫВОДЫ

На основе анализа результатов конечно-элементной модели прокатки порошковых лент в металлической оболочке установлено, что с увеличением угла наклона образующей клина α глубина внедрения частиц уменьшается при постоянной величине давления на поверхности частицы.

При увеличении и максимальных контактных напряжений процесса прокатки порошковой ленты глубина внедрения частицы сердечника (любой формы) в оболочку возрастает.

Наибольшая глубина внедрения наблюдается для частиц в форме клина и наименьшая – для шарообразных частиц сердечника.

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). – P. 945–956. – doi: 10.1007/s00170-012-4230-0
3. Новое оборудование для наплавки конусов и чап 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. Грибков Э. П. Конечно-элементное моделирование плющения порошковой проволоки / Э. П. Грибков // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2016. – № 1 (42). – С. 63–66.
6. 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). – P. 229–238. – doi: 10.1016/0020-7403(87)90037-3.
7. 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. – P. 330–336. http://www.ipme.ru/e-journals/RAMS/no_43313/05_433_zheng.pdf
8. Манилык Т. Практическое применение программного комплекса ABAQUS в инженерных задачах. Версия 6.5 / Т. Манилык, К. Ильин. – М.: МФТИ, ТЕСИС, 2006. – 99 с.
9. Кассов В. Д. Моделирование поведения частиц сердечника при прокатке порошковой ленты / В. Д. Кассов, Э. П. Грибков, С. Н. Грибкова // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ–Слов'янськ, 2003. – С. 140–143.

REFERENCES

1. Naplavka bystroiznashivajushhihsja detalej samozashhitnymi poroshkovymi lentami / B. V. Danil'chenko [i dr.]. // *Avtomaticeskaja 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). – P. 945–956. – doi: 10.1007/s00170-012-4230-0
3. Novee oborudovanie dlja naplavki konusov i chash zasypnyh apparatov / A. P. Zhudra, A. P. Voronchuk, A. A. Fomakin, S. I. Velikij // *Avtomaticeskaja 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. Gribov Je. P. Konechno-jelementnoe modelirovanie pljushhenija poroshkovej provoloki / Je. P. Gribov // *Obrabotka materialov davleniem: sbornik nauchnyh trudov.* – Kramatorsk: DGMA, 2016. – № 1 (42). – С. 63–66.
6. 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). – P. 229–238. – doi: 10.1016/0020-7403(87)90037-3.
7. 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. – P. 330–336. http://www.ipme.ru/e-journals/RAMS/no_43313/05_433_zheng.pdf
8. Manilyk T. Prakticheskoe primenenie programmnoho kompleksa ABAQUS v inzhenernyh zadachah. Versija 6.5 / T. Manilyk, K. Il'in. – М.: МФТИ, ТЕСИС, 2006. – 99 с.
9. Kassov V. D. Modelirovanie povedenija chastic serdechnika pri prokatke poroshkovej lenty / V. D. Kassov, Je. P. Gribov, S. N. Gribova // *Udoskonalennja procesiv ta obladnannja obrobki tiskom v metalurgii i mashinobuduvanni: tematich. zb. nauk. pr.* – Kramators'k–Slov'jans'k, 2003. – S. 140–143.

Кассов В. Д. – д-р техн. наук, проф. ДГМА
Грибков Э. П. – канд. техн. наук, доц. ДГМА
Грибкова С. Н. – канд. техн. наук, доц. ДГМА
Бережная Е. В. – канд. техн. наук, доц., докторант НТУУ «КПИ»

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск;
НТУУ «КПИ» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua

Статья поступила в редакцию 23.10.2016 г.