

УДК 621.778.6

Федоринов М. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛЮЩЕНИЯ КРУГЛОЙ ПРОВОЛОКИ МЕТОДАМИ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Производство ленты путем плющения профилей круглого поперечного сечения в валках с цилиндрической рабочей поверхностью не позволяет минимизировать диаметр заготовки и число проходов, так как в процессе деформации значительная часть металла смещается в продольном направлении и зависит от величины смещенного объема металла в вертикальном направлении, при этом на уширение идет незначительный смещенный объем. При этом следует иметь в виду, что применение валков с гладкой рабочей поверхностью приводит к неконтролируемому (свободному) уширению раската, которое зависит от многих факторов (диаметра заготовки, диаметра и состояния рабочей поверхности валков, наличие технологической смазки, пластичности и химического состава металла и пр.) [1]. Известно также, что при горячей прокатке-плющении создаются такие условия пластической деформации, при которых уширение достигает больших значений, чем при холодной деформации.

В целях увеличения ширины, когда свободного уширения при равномерной деформации металла по ширине в валках с гладкой бочкой недостаточно, применяют вынужденное уширение, которое является следствием неравномерной деформации металла по ширине. Для этого используют так называемые разгонные калибры [2].

На уширение при неравномерной деформации в значительной степени влияет форма калибров. Так, в разгонных калибрах с наклонными полками [2] уширение будет зависеть от угла наклона стенок ручья, осуществляющих «разгон» металла в ширину. Чем больше горизонтальная составляющая нормальной силы давления наклонной стенки калибра на металл или чем больше угол наклона этой же стенки, тем в большей степени будет происходить уширение. Практика показывает, что в отдельных случаях применение разгонных калибров с выпуклыми наклонными гранями обеспечивают более высокое значение уширения [2; 3].

Применение интенсивных обжатий и разгонных калибров обеспечивает уменьшение значения вытяжки и ведет к росту уширения и, как следствие, снижению числа проходов.

Результаты исследований, приведенные в работах [3–6], свидетельствуют о том, что в первом пропуске оптимальной формой разгонного гребня является такая его форма и размеры, когда радиус гребня и радиусы сопротивления гребня с цилиндрической частью валка соответствуют радиусу самой заготовки [4].

При прокатке в первом пропуске основная пластическая деформация сконцентрирована в центре раската, но благодаря наклонным стенкам разгонного гребня происходит вынужденное повышенное уширение раската. При прокатке во втором пропуске основная пластическая деформация смещается от центра раската на край, тем самым еще более увеличивается его уширение.

Обзор литературы показал, что накопить высокий уровень деформаций при прокатке для обеспечения ИПД возможно за счет применения разгонных калибров [7–11]. Выпуклый рабочий профиль валков позволяет уменьшить удлинение и увеличить уширение при прокатке. Увеличение уширения при прокатке позволит уменьшить изменение площади поперечного сечения заготовки, что увеличит число проходов и позволит накопить более высокий уровень деформаций в заготовке, чем при использовании прокатки на гладкой бочке. Данный аспект не исследовался ранее, поэтому цель данного раздела – исследовать уширение и распределение деформаций при прокатке разгонными калибрами, которые предложены авторами [12–13].

Цель данного исследования – установить влияние примененных комбинаций выпуклых и цилиндрических калибров на формоизменение и изменение структуры металла заготовки.

На основе обзора литературных источников и опытной прокатки образцов из технического свинца, в качестве базового принят способ изготовления ленты плющением [12, 13], который включает поэтапную деформацию заготовки круглого сечения при помощи разгонных калибров, которые имеют выпуклую форму.

В процессе экспериментов с образцами из технического свинца и горячекатаной стали 35 удалось усовершенствовать указанный выше способ путем изменения профиля разгонного калибра и очередности прокатки в разгонных калибрах и цилиндрических валках (на гладкой бочке), что позволило стабилизировать ориентацию оси заготовки по оси гребня разгонного калибра, обеспечить равномерное распределение деформации заготовки круглого сечения и создать условия большего пластического течения металла в поперечном направлении.

Это достигается за счет того, что в процессе изготовления ленты плющением заготовку поочередно деформируют в разгонных калибрах и цилиндрических валках. В первом проходе деформацию цилиндрической заготовки ведут до толщины в середине сечения

$$h_1' = (0,95...1,2)R_3 \quad (1)$$

при помощи разгонных калибров (рис. 1, а), имеющих выпукло-вогнутый профиль, геометрия которого определяется выражениями:

$$R_{r1} = (1,15...1,25)R_3; \quad R_{e1} = (0,7...0,75)R_3;$$

или

$$R_{e1} = (0,6...0,65)R_{r1}, \quad (2)$$

где R_{r1} – радиус гребня разгонного калибра в первом проходе, мм;

R_{e1} – радиус впадины разгонного калибра в первом проходе, мм;

R_3 – радиус заготовки, мм.

Второй проход (см. рис. 1, б) осуществляет в калибрах цилиндрической формы до получения ленты толщиной h_1 и шириной b_1 , при этом h_1 находят по выражению

$$h_1 = (0,95...1,0)h_1', \quad (3)$$

где h_1 – толщина раската во втором проходе, мм;

h_1' – толщина раската в первом проходе, мм.

Это условие используется, если за этим следует третий проход в разгонных калибрах, если нет то $h_1 < 0,95h_1'$.

Третий проход (см. рис. 1, в) осуществляет в разгонных калибрах, имеющих выпукло-вогнутый профиль до толщины h_2' в середине сечения, при этом

$$R_{r2} = (0,25...0,35)b_1^2 / h_1; \\ R_{e2} = (0,6...0,65)R_{r2}, \quad (4)$$

где R_{r2} – радиус гребня разгонного калибра в третьем проходе, мм;

R_{e2} – радиус впадины разгонного калибра в третьем проходе, мм.

Последующие проходы ведут в калибрах цилиндрической формы (см. рис. 1, г) до получения ленты толщиной h_2 и шириной b_2 , при этом h_2 находят по выражению $h_2 = (0,95...1,0)h_2'$, если предусматривается несколько проходов, если нет – то $h_2 < 0,95h_2'$.

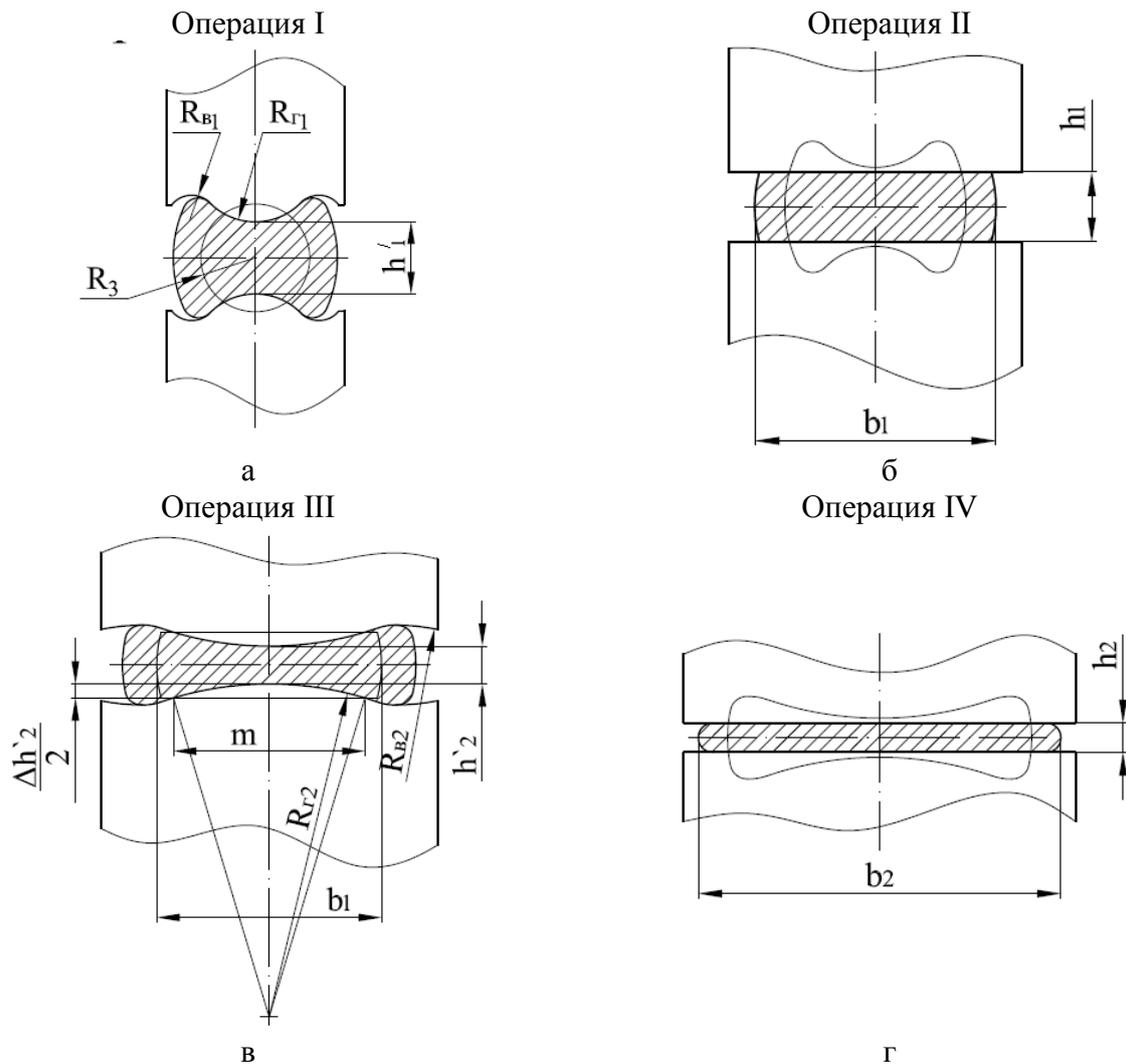


Рис. 1. Способ получения полосы плющением:

а, в – деформация в разгонных калибрах; б, г – деформация в цилиндрических валках (на гладкой бочке)

Поэтапная деформация заготовки круглого сечения путем чередования прокатки в разгонных калибрах, имеющих выпуклый профиль и в калибрах цилиндрической формы обеспечивает образование недеформируемых или мало деформируемых зон металла в центральной части ленты четных проходах и по ее кромкам – в нечетных проходах, что во всех этих случаях приводит к появлению продольных сжимающих напряжений в зонах развитой пластической деформации металла и способствует уменьшению вытяжки, а, как следствие, увеличению уширения. Этот эффект и обеспечивает максимальное уширение заготовки и получение ленты разной ширины с заданной толщиной за минимальное количество проходов.

Максимальное уширение в процессе плющения предложенным способом способствует сохранению площади поперечного сечения заготовки, что в свою очередь позволяет увеличить число проходов, а следовательно, накопить высокий уровень деформаций в теле заготовки, что изменяет структуру. Равномерность распределения деформаций обеспечивается за счет применения комбинаций выпуклых калибров (прорабатываются поверхностные и центральные слои заготовки) и цилиндрических калибров (прорабатываются боковые участки заготовки). Таким образом, предложенная схема плющения позволяет накопить равномерные деформации высокого уровня. Поэтому предложенную схему плющения можно отнести к процессам деформирования с интенсивной пластической деформацией.

Разработанная схема прокатки и калибровки позволяет получать широкий сортамент прокатных изделий из круглой заготовки. При этом могут быть реализованы различные сочетания операций (см. рис. 1): I-II; I-II-II; I-II-III-IV; I-II-III-IV-IV и др.

Подтвердить гипотезу накопления деформаций высокого уровня при плющении выпуклыми и цилиндрическими калибрами необходимо на основании результатов моделирования напряженно-деформированного состояния металла заготовки.

Рассматриваемая применительно к анализу процесса плющения круглой проволоки использовалась расчетная схема (рис. 2), которая представляла собой деформируемую заготовку 1, два рабочих валка с калиброванной бочкой 2, моделирующих первую клетку, два рабочих валка с гладкой бочкой 3, моделирующих вторую клетку.

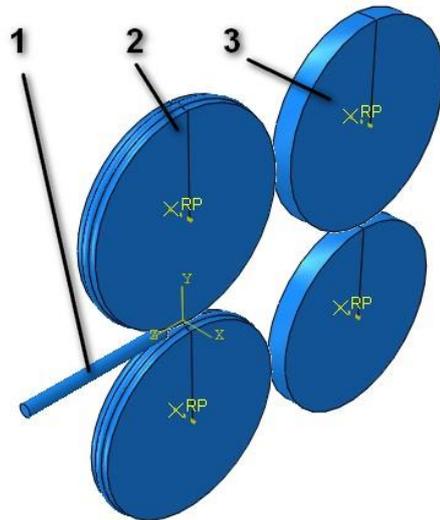


Рис. 2. Конечно-элементная в глобальной системе координат модель процесса плющения круглой проволоки (1 – заготовка; 2 – калибры с выпуклой бочкой первой клетки; 3 – валки с гладкой бочкой второй клетки)

При исследовании использовалась плоскость симметрии, что позволило сократить время расчёта.

С учетом изложенного выше производили дискретизацию объема (построение конечно-элементной сетки), занимаемого моделью, на элементарные области (конечные элементы) (рис. 3). Для моделирования калибров были использованы трехмерные недеформируемые элементы. Для моделирования заготовки были использованы восьми узловые линейные, твердотельные редуцированные элементы с контролем разрушения [14–15].

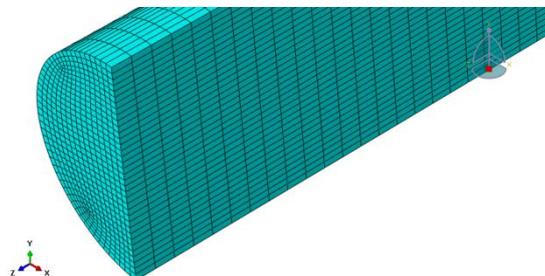


Рис. 3. Конечно-элементная сетка заготовки

В соответствии с расчетной схемой (см. рис. 2) катающий диаметр рабочих валков составил $D = 280$ мм. Непосредственно моделирование процесса плющения было выполнено для проволоки диаметром $d = 17$ мм. Межвалковый зазор в первой клетке по гребню калибра составил 9,5 мм, во второй – 9,0 мм.

Исходная конечно-элементная модель имеет следующие граничные условия: валки имеют одну вращательную степень свободы и угловую скорость вращения равную 0,1 рад/с.

В расчете использовалась модель упругой пластичности металла, в качестве материала листа была принята сталь 35 [16].

На рисунке 4 представлены поля распределения напряжений и деформаций по длине заготовки при прокатке в выпуклых калибрах первой клетки, а на рисунке 5 – при прокатке на гладкой бочке второй клетки.

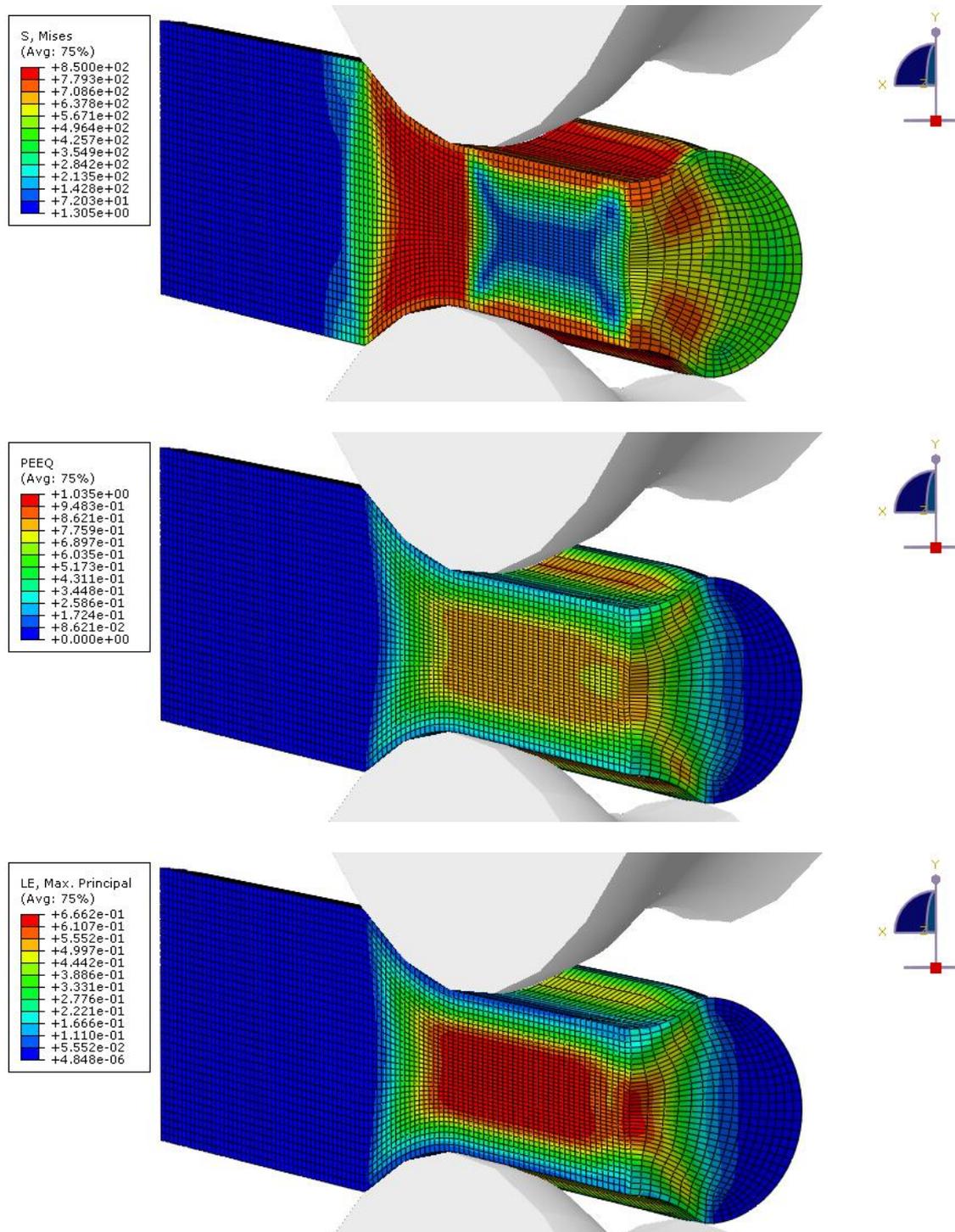


Рис. 4. Распределение напряжений и деформаций по длине заготовки при прокатке в разгонном калибре первой клетки:

а – эквивалентные напряжения, б – эквивалентные деформации, в – логарифмические деформации

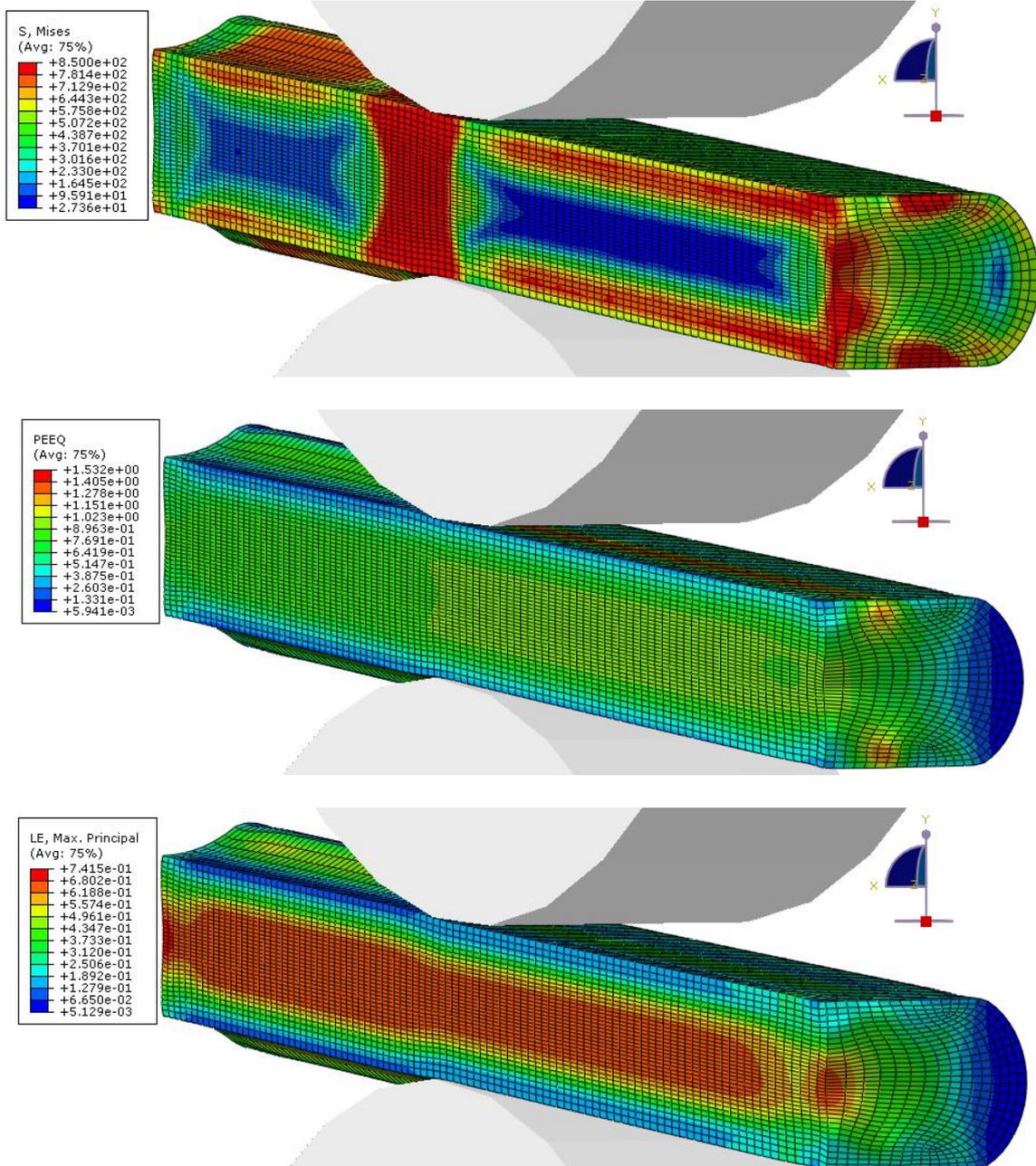


Рис. 5. Распределение напряжений и деформаций по длине заготовки при прокатке на гладкой бочке второй клетки:

а – эквивалентные напряжения, б – эквивалентные деформации, в – логарифмические деформации

Анализ полученных результатов напряженно-деформированного состояния заготовки позволил установить, что наибольшую деформацию получили срединные слои, в то время как боковые кромки практически не деформировались.

Для определения эффективности предложенной технологии прокатки в разгонных калибрах на рисунке б представлены расчетные распределения напряжений и деформаций по сечению заготовки после III и IV проходов (см. рис. 1).

После анализа данных полей деформаций можно сделать вывод, что при использовании прокатки в разгонных калибрах уровень поперечных деформаций выше, уровень высотных деформаций выше в срединных слоях заготовки и более равномерен в областях кромок заготовок. Уровень истинных деформаций ниже по краевым областям и выше в срединной части с более равномерным распределением по сечению.

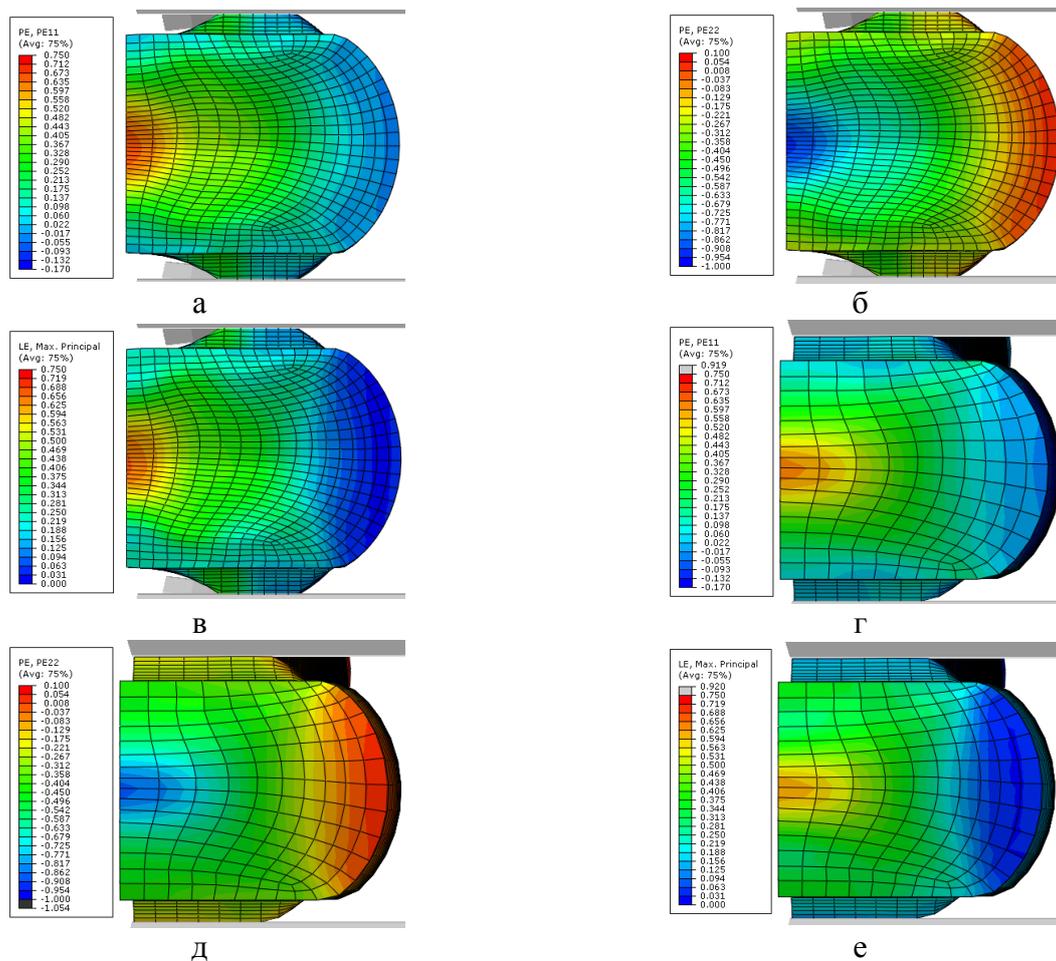


Рис. 6. Распределение деформаций по сечению заготовки после второго прохода при прокатке в разгонном калибре (а, б, в) и в гладких валках (г, д, е):
 а, г – распределение поперечных деформаций; в, д – распределение высотных деформаций; г, е – распределение истинных деформаций)

На рис. 7 представлены геометрические размеры заготовки после прокатки в разгонном калибре (рис. 7,а) и после прокатки в гладких валках (рис. 7,б). Ширина ленты в первом случае составила 2,25 мм, а во втором – 2,20 мм, что подтверждает эффективность технологии прокатки в разгонных калибрах.

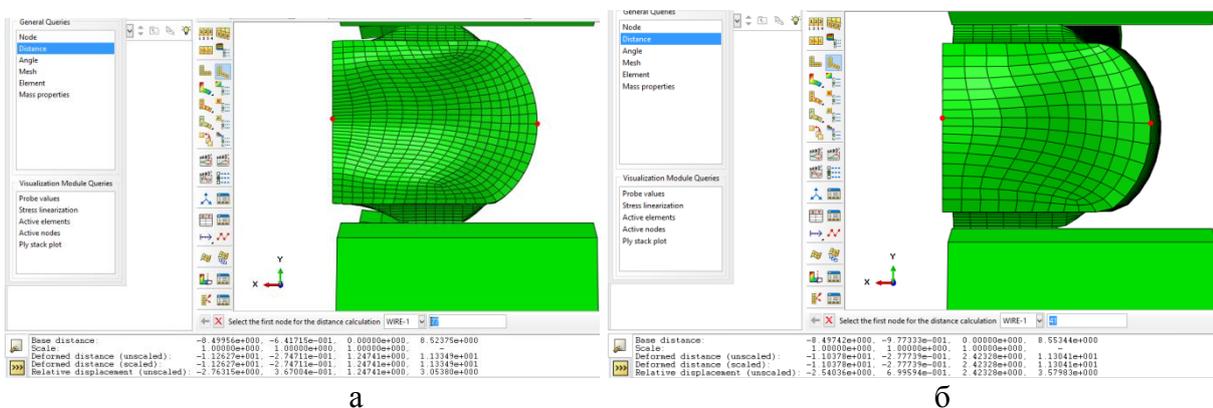


Рис. 7. Геометрические размеры плющенной ленты после прокатки в разгонном калибре (а) и на гладкой бочке (б)

ВЫВОДЫ

На основе анализа напряженно-деформированного состояния металла на начальном этапе его деформирования при изготовлении лент путем плющения, выбраны эффективные схемы прокатки, позволяющие минимизировать удлинение металла в продольном направлении и тем самым увеличить его уширение. В частности одна из предложенных схем предполагает использование разгонных калибров предполагающих наличие выпуклого профиля на одном из валков с радиусом гребня, равным 61...66 % от диаметра заготовки. Предложенная схема позволяет накапливать равномерные деформации высокого уровня.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Владимиров Ю. В. Производство плющеной стальной ленты / Ю. В. Владимиров, П. П. Нижник, Ю. А. Пуртов. – М. : Metallurgija, 1985. – 119 с.
2. Диомидов Б. Б. Калибровка прокатных валков / Б. Б. Диомидов, Н. В. Литовченко. – М. : Metallurgija, 1970. – 312 с.
3. Капланов В. И. Пути развития производства плющеной ленты / В. И. Капланов, В. П. Чумаков, М. Г. Коренко // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 1(20). – С. 205–208.
4. Капланов В. И. Энергоэффективный процесс получения плющенных лент в условиях мелкосортных станов / В. И. Капланов, М. Г. Коренко, Н. В. Староста // Вестник Национального технического университета : ХПИ, 2010. – № 42. – С. 28–32.
5. Пат. 53391 UA, МПК В21В 1/02. Спосіб виготовлення стрічки плющенням / В. І. Капланов, В. П. Чумаков, М. Г. Коренко, Н. В. Староста; заявитель и патентообладатель М. Г. Коренко. – № и 201002663 ; заявл. 10.03.2010 ; опубл. 11.10.2010, Бюл. № 19. – 2 с.
6. Пат. 59136 UA, МПК В21В 1/02. Калібр для виготовлення стрічки плющенням / В. І. Капланов, В. П. Чумаков, М. Г. Коренко; заявитель и патентообладатель М. Г. Коренко. – № и 2010 10795; заявл. 07.09.2010 ; опубл. 10.05.2011, Бюл. № 9. – 6 с.
- 7 Numerical and experimental studies of pure copper processed by a new severe plastic deformation method / Chengpeng Wang, Fuguo Li, Qinghua Li, Lei Wang // Materials Science & Engineering A. – 2012. – Vol. 548 – pp. 19–26. DOI: 10.1016/j.msea.2012.03.055.
- 8 A comparison between equal channel angular pressing and asymmetric rolling of silver in the severe plastic deformation regime / G. Angella, B. Esfandiar Jahromi, M. Vedani // Materials Science and Engineering: A. – 2013. – Vol. 559. – pp. 742–750. DOI: 10.1016/j.msea.2012.09.018.
- 9 Application of hydrostatic integration parameter for free-forging and rolling / Morihiko Nakasaki, Ichiro Takasu, Hiroshi Utsunomiya // Journal of Materials Processing Tech. – 2006. – Vol. 177. – # 1-3. – pp. 521–524. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.04.102.
- 10 Numerical simulation of aluminum alloy 6061 micro-mold fabrication for the production of polymeric microstructures by micro-hot-embossing / N K Tran, Shawn A Chester, Y C Lam, L Anand, C Y Yue // Journal of Micro-mechanics and Microengineering. – 2005. – Vol. 22 – N. 8. – pp. 1–11. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0960-1317/22/8/085005>.
- 11 Kinematics of metal flow during twist extrusion investigated with a new experimental method / Beygelzimer Y., Reshetov A., Synkov S., Prokof'eva O., Kulagin R. // Journal of Materials Processing Technology. – 2009. – Vol. 209(7). – pp. 3650–3656. DOI: 10.1016/j.jmatprotec. 2008.08.022.
12. Пат. 102648 Україна, МПК В21В 1/02. Спосіб виготовлення стрічки плющеної / Марков О. Є., Руденко Н.О., Ячмінь Ю. О., Розов Ю. Г. ; заявник та патентоволодар Донбаська державна машинобудівна академія. – № и201504725 ; заявл. 15.05.2015 ; опубл. 10.11.2015, Бюл. № 21. – 3 с.
13. Пат. 102650 Україна, МПК В21В 1/02. Спосіб виготовлення стрічки плющеної / Марков О. Є., Найдьонов В.С., Неруш А. О., Коренко М. Г. ; заявник та патентоволодар Донбаська державна машинобудівна академія. – № и201504738 ; заявл. 15.05.2015 ; опубл. 10.11.2015, Бюл. № 21. – 3 с.
14. Боровік, П. В. Теоретичні дослідження процесів обробки металів тиском на основі методу скінчених елементів: Навч. Посіб. / П.В. Боровік. – Алчевськ: ДонДТУ, 2012. – 170 с.
15. Манилык, Т. Практическое применение программного комплекса ABAQUS в инженерных задачах. Версия 6.5 / Т. Манилык, К. Ильин. — М.: МФТИ, ТЕСИС, 2006. — 99 с.
16. Кроха В. А. Кривые упрочнения металлов при холодной деформации / В. А. Кроха. – М.: Машиностроение, 1968. – 131 с.

REFERENCES

1. Vladimirov Ju. V. Proizvodstvo pljushhenoj stal'noj lenty / Ju. V. Vladimirov, P. P. Nizhnik, Ju. A. Purtov. – М. : Metallurgija, 1985. – 119 s.
2. Diomidov B. B. Kalibrovka prokatnyh valkov / B. B. Diomidov, N. V. Litovchenko. – М. : Metallurgija, 1970. – 312 s.

3. Kaplanov V. I. Puti razvitija proizvodstva pljushhenoj lenty / V. I. Kaplanov, V. P. Chumakov, M. G. Korenko // *Obrabotka materialov davleniem : sb. nauch. tr. – Kramatorsk : DGMA, 2010. – № 1(20). – S. 205–208.*
4. Kaplanov V. I. Jenergojeffektivnyj process poluchenija pljushhenyh lent v uslovijah melkosortnyh stanov / V. I. Kaplanov, M. G. Korenko, N. V. Starosta // *Vestnik Nacional'nogo tehničeskogo universiteta : HPI, 2010. – № 42. – S. 28–32.*
5. Pat. 53391 UA, MPK V21V 1/02. Sposib vigotovlennja strichki pljushhennjam / V. I. Kaplanov, V. P. Chumakov, M. G. Korenko, N. V. Starosta; zajavit' i patentoobladatel' M. G. Korenko. – № u 201002663 ; zajavl. 10.03.2010 ; opubl. 11.10.2010, Bjul. № 19. – 2 s.
6. Pat. 59136 UA, MPK V21V 1/02. Kalibr dlja vigotovlennja strichki pljushhennjam / V. I. Kaplanov, V. P. Chumakov, M. G. Korenko; zajavit' i patentoobladatel' M. G. Korenko. – № u 2010 10795; zajavl. 07.09.2010 ; opubl. 10.05.2011, Bjul. № 9. – 6 s.
- 7 Numerical and experimental studies of pure copper processed by a new severe plastic deformation method / Chengpeng Wang, Fuguo Li, Qinghua Li, Lei Wang // *Materials Science & Engineering A. – 2012. – Vol. 548 – pp. 19–26. DOI: 10.1016/j.msea.2012.03.055.*
- 8 A comparison between equal channel angular pressing and asymmetric rolling of silver in the severe plastic deformation regime / G. Angella, B. Esfandiari Jahromi, M. Vedani // *Materials Science and Engineering: A. – 2013. – Vol. 559. – pp. 742–750. DOI: 10.1016/j.msea.2012.09.018.*
- 9 Application of hydrostatic integration parameter for free-forging and rolling / Morihiko Nakasaki, Ichiro Takasu, Hiroshi Utsunomiya // *Journal of Materials Processing Tech. – 2006. – Vol. 177. – # 1-3. – pp. 521–524. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.04.102.*
- 10 Numerical simulation of aluminum alloy 6061 micro-mold fabrication for the production of polymeric microstructures by micro-hot-embossing / N K Tran, Shawn A Chester, Y C Lam, L Anand, C Y Yue // *Journal of Micro-mechanics and Microengineering. – 2005. – Vol. 22 – N. 8. – pp. 1–11. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0960-1317/22/8/085005>.*
- 11 Kinematics of metal flow during twist extrusion investigated with a new experimental method / Beygelzimer Y., Reshetov A., Synkov S., Prokof'eva O., Kulagin R. // *Journal of Materials Processing Technology. – 2009. – Vol. 209(7). – pp. 3650–3656. DOI: 10.1016/j.jmatprotec. 2008.08.022.*
12. Pat. 102648 Ukraïna, MPK V21V 1/02. Sposib vigotovlennja strichki pljushhennoi / Markov O. C., Rudenko N.O., Jachmin' Ju. O., Rozov Ju. G. ; zajavnik ta patentovolodar Donbas'ka derzhavna mashinobudivna akademija. – № u201504725 ; zajavl. 15.05.2015 ; opubl. 10.11.2015, Bjul. № 21. – 3 s.
13. Pat. 102650 Ukraïna, MPK V21V 1/02. Sposib vigotovlennja strichki pljushhennoi / Markov O. C., Najd'onov V.S., Nerush A. O., Korenko M. G. ; zajavnik ta patentovolodar Donbas'ka derzhavna mashinobudivna akademija. – № u201504738 ; zajavl. 15.05.2015 ; opubl. 10.11.2015, Bjul. № 21. – 3 s.
14. Borovik, P. V. Teoretichni doslidzhennja procesiv obrobki metaliv tiskom na osnovi metodu skinchenih elementiv: Navch. Posib. / P.V. Borovik. – Alchevs'k: DonDTU, 2012. – 170 s.
15. Manilyk, T. Praktičeskoe primenenie programmnoho kompleksa ABAQUS v inženernyh zadachah. Versija 6.5 / T. Manilyk, K. Il'in. — M.: MFTI, TESIS, 2006. — 99 s.
16. Kroha V. A. Krivye uprochnenija metallov pri holodnoj deformacii / V. A. Kroha. – M.: Mashinostroenie, 1968. – 131 s.

Федоринов М. В. – канд. техн. наук, доц. ДГМА

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua

Статья поступила в редакцию 17.03.2016 г.