

С. 60–68. 4. Попов С.А. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов / С.А. Попов, Н.П. Малевский, Л.М. Терещенко. – М.: Машиностроение, 1977. – 263 с. 5. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. «Механика резания материалов» – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с. 6. Андиллахай А.А. Научные основы эффективной отделочной абразивной обработки деталей затопленными струями: автореф. дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук : спец. 05.02.08 «Технология машиностроения» / А.А. Андиллахай. – Одесса, 2013. – 47 с. 7. Якимов А.В. Физическая сущность и технологические возможности прерывистого шлифования / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков // Сучасні системи технологій у машинобудуванні. Збірник наукових праць, присвячений 90-річчю з дня народження професора Одеського національного політехнічного університету (ОНПУ) Якимова О.В. – Д.: ЛІРА. – 2015. – С. 38-43.

Bibliography (transliterated): 1. Yakimov A.V. Abrazivno-almaznaya obrabotka fasonnykh poverkhnostey / A.V. Yakimov. – Moscow: Mashinostroenie, 1984. – 212 p. 2. Yakimov A.V. Optimizatsiya protessa shlifovaniya / A.V. Yakimov. – Moscow: Mashinostroenie, 1975. – 175 p. 3. Marthuk V.I. Umovy pidvyshennya yakosti ta efektyvnosti beztsentrovogo shlifuvannya til kothennyh rolykopydshypnykiv v umovakh perenalagodzhuvalnogo vyrobnytstva / V.I. Marthuk, Y.A. Lukyanthuk // Suthasni systemy tekhnologiy u mashynobuduvanni. Zbirnyk naukovykh prats, prysvyathenyi 90-riththyu z dnya narodzhennya profesora Odesjkogo natsionalnogo politekhnithnogo universytetu (ONPU) Yakimova O.V. – Donetsk: LIRA. – 2015. – P. 60–68. 4. Popov S.A. Abrazivno-almaznaya obrabotka metallov i tverdyykh splavov / S.A. Popov, N.P. Malevskiy, L.M. Terethenko. – Moscow: Mashinostroenie, 1977. – 263 p. 5. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologiy mashinostroeniya / pod obsh. red. F.V. Novikova i A.V. Yakimova. V 10 tomakh. – Vol. 1. «Mekhanika rezaniya materialov» – Odessa: ONPU, 2002. – 580 p. 6. Andilakhay A.A. Nauthnye osnovy effektivnoy otdelothnoy abrazivnoy obrabotki detaley zatoplennymi struyami: avtoref. dis. na soiskanie nauthn. stepeni dokt. tekhn. nauk : spets. 05.02.08 «Tekhnologiya mashinostroeniya» / A.A. Andilakhay. – Odessa, 2013. – 47 p. 7. Yakimov A.V. Fizicheskaya sushnosty i tekhnologicheskieskie vozmozhnosti preryvistogo shlifovaniya / A.V. Yakimov, F.V. Novikov, G.V. Novikov // Suthasni systemy tekhnologiy u mashynobuduvanni. Zbirnyk naukovykh prats, prysvyathenyi 90-riththyu z dnya narodzhennya profesora Odesjkogo natsionalnogo politekhnithnogo universytetu (ONPU) Yakimova O.V. – Donetsk: LIRA. – 2015. – P. 38–43. *Поступила (received) 17.07.2015*

Поступила (received) 18.07.2015

УДК 621.77.014

С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ, преподаватель-стажер, НТУ «ХПИ»;
О. И. ТРИШЕВСКИЙ, докт. техн. наук, проф., ХНУСХ
им. П. Василенка, Харьков

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА В МЕСТАХ ИЗГИБА ДО 180°

В статье рассматривается теоретическое моделирование процесса изгиба до 180°. Приведено решение задачи по определению деформаций методом механики сплошных сред с описанием деформаций полем скоростей перемещений. Приведен сопоставительный анализ деформированного состояния посредством моделирования процесса методом конечных элементов. Приведены графические описания результатов для частного случая данной задачи.

Ключевые слова: теоретический анализ, деформированное состояние, метод конечных элементов, метод механики сплошных сред/

Введение. Одним из эффективных путей экономии металла является увеличение производства и поиск новых сфер применения гнутых профилей – наиболее экономичного вида металлопроката. Технологические возможности валковой формовки позволяют изготавливать профили практически любой длины, достаточно большой ширины, со сложной формой поперечного сечения. Такие профили практически готовы к применению и требуют в ряде случаев лишь минимальной дальнейшей механической или другой доработки.

Первоочередная потребность в специальных гнутых профилях с местами изгиба на 180° только в основных металлопотребляющих регионах Украины составляет около 30 тыс. тонн в год. Исследования, связанные с анализом формоизменения мест изгиба металла на 180° и разработкой практических рекомендаций по технологии изготовления специальных гнутых профилей, важны и актуальны для реализации программ ресурсосбережения в Украине.

Цель работы – создание математической модели деформированного состояния металла в местах его изгиба на 180° .

Анализ источников информации. В работах [1, 2] приведены результаты теоретических экспериментальных исследований деформирования металла до 180° , а также сформулированы практические рекомендации для разработки технологических процессов производства профилей из металла толщиной 3 мм и более.

Теоретический анализ очага деформации методом механики сплошных сред. В настоящей работе для анализа напряженно-деформированного состояния металла при валковой формовке профилей с местами изгиба на 180° и определения параметров, характеризующих процесс, использован метод механики сплошных сред с описанием очага деформации полем скоростей перемещений. Разработка и внедрение этого метода теоретических исследований применительно к процессам пластического течения металла связана с работами Ю. Н. Алексеева [5, 6], А. А. Ильюшина [7], Г. Я. Гуна [8], Л. И. Седова [9], и др.

Метод предполагает использование уравнений механики сплошных сред в их наиболее общей форме, то есть в виде уравнений движения вязкой жидкости, а также специальных характеристик, позволяющих учитывать отличия в деформировании твердых металлов от течения вязких жидкостей.

В основе данного метода лежит закономерность, определяющая связь между напряжениями и деформациями, выраженный через девиаторы напряжений.

В качестве основного материала при изготовлении профилей с элементами изгиба до 180° применяют сталь Ст. 3, зачастую используются многослойные покрытия.

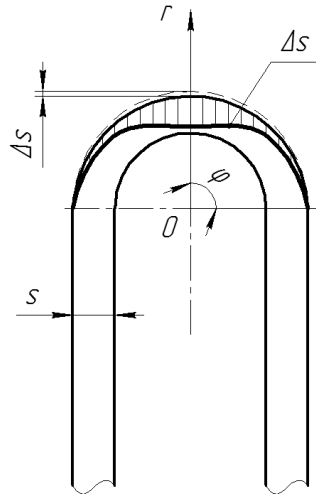


Рис. 1– Распределение утонений вдоль очага деформации при изгибе до 180°

Экспериментальные исследования утонения в местах изгиба [6] показали, что по мере прохождения полосы через валки профилегибочного стана, т.е. с уменьшением внутреннего радиуса места изгиба, утонение увеличивается (рис. 1). При этом по ширине места изгиба оно развивается неравномерно и является функцией угла φ в месте изгиба.

Так как скорости частиц металла тождественно равны перемещениям в единицу времени, изложенное выше позволяет записать радиальную составляющую скорости в общем виде следующим образом:

$$v_r = -\frac{v_0}{R_H - \frac{R_B^2}{R_H}} \left(r - \frac{R_B^2}{r} \right) J(\varphi) \frac{z}{l}. \quad (1)$$

В выражении (1) неизвестна функция $J(\varphi)$. На основании экспериментальных исследований УкрНИИМет установлено, что изменение утонения по ширине места изгиба описывается функцией:

$$J(\varphi) = \cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0}. \quad (2)$$

Экспериментальные исследования, выполненные в рамках данной работы, показывают, что распределение утонений в очаге деформации для тонколистового металла описываются следующей зависимостью:

$$J(\varphi) = f \cos^4(0,8\varphi). \quad (3)$$

где f – экспериментальный коэффициент.

Формулы для определения составляющих скоростей движения частиц металла в месте изгиба полосы за счет уменьшения толщины:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_r = -\frac{v_0}{R_H - \frac{R_B^2}{R_H}} \left(r - \frac{R_B^2}{r} \right) \frac{z}{l} \cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0}; \\ v_\varphi = \frac{1}{\pi} v_0 \varphi_0 \frac{r}{R_H - \frac{R_B^2}{R_H}} \left(\frac{3}{4} \frac{\pi\varphi}{\varphi_0} + \sin \frac{\pi\varphi}{\varphi_0} + \frac{1}{32} \sin \frac{\pi\varphi}{\varphi_0} \right) \frac{z}{l}; \\ v_z = 0. \end{array} \right. \quad (4)$$

Представленные на рис. 2 диаграммы распределения составляющих скоростей v_r и v_φ в месте изгиба полосы показывают, что максимальное значение радиальная составляющая скорости v_r принимает в осевой плоскости валков формирующей клетки на внешней поверхности места изгиба по биссектрисе угла загибки. По ширине места изгиба (очага деформации) радиальная составляющая скорости v_r плавно убывает от максимальных значений посередине места изгиба до 0 на участках, где радиус изгиба переходит в плоские участки профиля. По длине очага деформации радиальная скорость v_r также плавно убывает от максимальных значений в осевой плоскости формирующей клетки до 0 в осевой плоскости валков предшествующей клетки стана. По толщине формируемой полосы радиальная скорость v_r плавно убывает от максимальных значений на внешней поверхности участка изгиба до 0 на его внутренней поверхности.

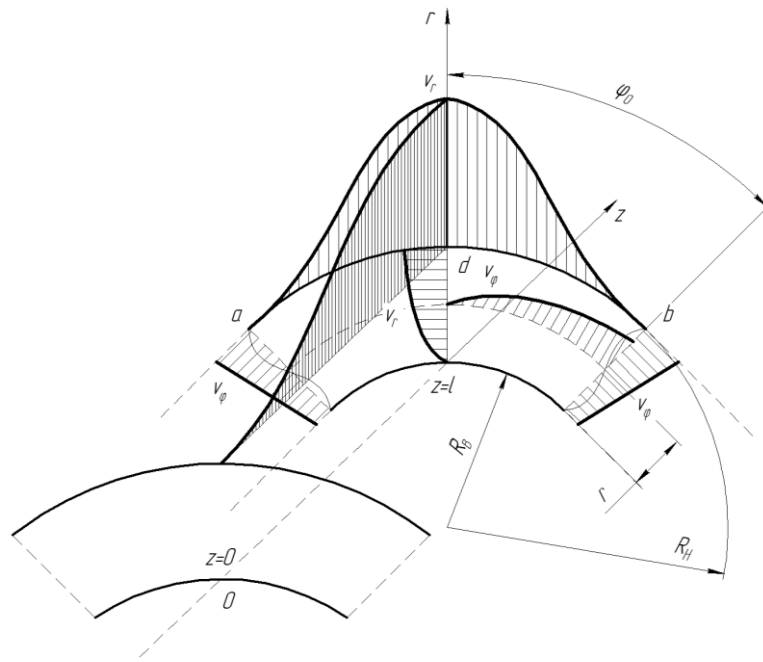


Рис. 2.—Эпюры поля скоростей перемещения при изгибе

Тангенциальная составляющая скорости v_φ по ширине места изгиба плавно возрастает по параболической зависимости от 0 по биссектрисе угла изгиба до максимальных значений на участках, где радиус изгиба переходит в плоские участки профиля. По толщине же полосы скорость v_φ пропорционально убывает от максимальных значений на внешней поверхности участка изгиба до некоторых конечных значений на внутренней поверхности этого участка.

После определения скорости перемещения частиц металла в месте изгиба, возможно определение компонентов скорости деформаций.

$$\varepsilon_{rr} = -\frac{f \cdot v_0 \cdot \cos^4(0,8\varphi)}{R_H - \frac{R_B^2}{R_H}} \left(1 + \frac{R_B^2}{r^2}\right)$$

$$;$$

$$\varepsilon_{\varphi\varphi} = -\frac{f \cdot v_0 \cdot \cos^4(0,8\varphi)}{r \left(R_H - \frac{R_B^2}{R_H}\right)} \left(r - \frac{R_B^2}{r^2}\right) - \frac{f \cdot v_0 \cdot \cos^4(0,8\varphi)}{r \left(R_H - \frac{R_B^2}{R_H}\right)} \left(1 + \frac{R_B^2}{r^2}\right);$$

$$\varepsilon_{r\varphi} = \frac{2\pi}{\varphi_0} \frac{v_0}{R_H - \frac{R_B^2}{R_H}} \left(1 + \frac{R_B^2}{r^2}\right) \cos^3 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \sin \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0}; \quad (5)$$

$$\varepsilon_{\varphi z} = 0; \quad \varepsilon_{zr} = 0; \quad \varepsilon_{zz} = 0.$$

Деформация утонения как производная от скорости деформации по времени примет вид:

$$\begin{aligned}
 e_{rr} &= \frac{R_B^2 R_H f v_0 \cos^4(0,8\varphi) + r^2 R_H f v_0 \cos^4(0,8\varphi)}{R_B^2 r^2 - R_H^2 r^2} \\
 e_{r\varphi} &= \frac{48R_H \varphi f r^3 v_0 + 40R_H f r^3 v_0 \sin(1,6\varphi) + 5R_H f r^3 v_0 \sin(3,2\varphi)}{64R_B^2 r^3 - 64R_H^2 r^3} - \\
 &\quad - \frac{64R_B^2 R_H f v_0 \cos^4(0,8\varphi) + 64R_H f r^2 v_0 \cos^4(0,8\varphi)}{64R_B^2 r^3 - 64R_H^2 r^3} \quad , (6) \\
 e_{\varphi\varphi} &= \frac{R_B^2 R_H f v_0 \cos^4(0,8\varphi) + r^2 R_H f v_0 \cos^4(0,8\varphi) + r^3 R_H f v_0 \cos^4(0,8\varphi)}{R_B^2 r^3 - R_H^2 r^3} - \\
 &\quad - \frac{R_B^2 R_H r f v_0 \cos^4(0,8\varphi)}{R_B^2 r^3 - R_H^2 r^3} \\
 e_{\varphi z} &= 0 \\
 e_{zr} &= 0
 \end{aligned}$$

Для теоретической модели, полученной на основании исследований УкрНИИМет для металла толщиной свыше 3 мм, данная зависимость примет вид:

$$e_{rr} = \frac{R_H v_0 R_B^2 \cos^4\left(\frac{\pi\varphi}{2\varphi_0}\right) + R_H v_0 r^2 \cos^4\left(\frac{\pi\varphi}{2\varphi_0}\right)}{R_B^2 r^2 - R_H^2 r^2} \quad (7)$$

Полученные распределения e_{rr} , в зависимости от угла для размеров образцов, аналогичных примененным в экспериментальной части темплетам, приведены на рис. 3 и рис. 4

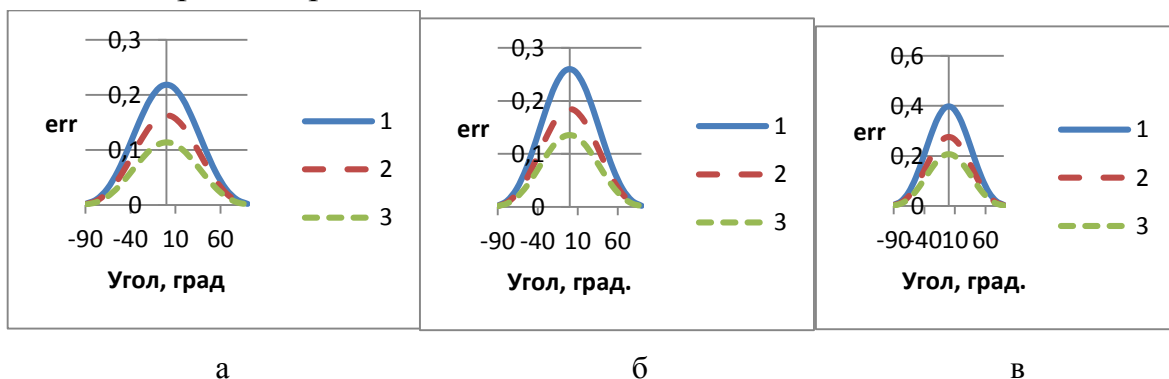


Рис. 3–Распределение деформаций e_{rr} 1 – $s=1$; 2 – $s=1,5$; 3 – $s=2,4$;
а – $r=s$; б – $r=2s$; в – $r=3s$

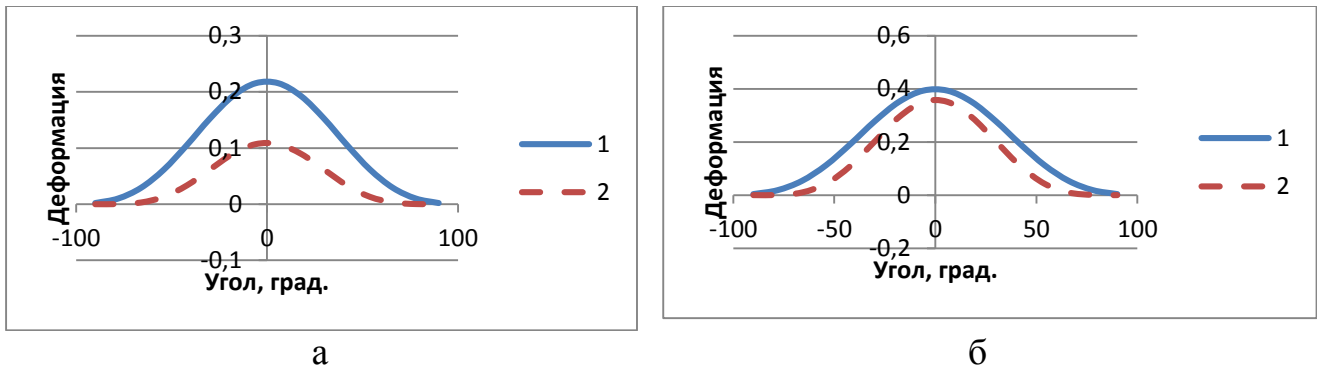


Рис. 4.–Сопоставление распределения деформаций e_{rr} полученных по разным методикам при: а – $s=0,5$ мм, $h=s$; б – $s=2,4$ мм

Полученные зависимости показывают, что деформации достигают наибольших значений на центральной оси очага деформации, а также что значения максимальной деформации тем меньше, чем больше радиус подгибки, но тем больше, чем больше толщина металла. Также установлено, что зависимости (6) и (7) дают схожую картину распределения деформаций, однако зависимость (6) требует введения дополнительного уточняющего коэффициента для получения значений, соответствующих экспериментальным данным. Расхождение значений для обеих теоретических зависимостей значительно снижается по мере приближения к верхней границе рассматриваемого интервала толщин (0,5–3 мм), и достигает 40–50% на нижней границе.

На рис. 5 представлена зависимость теоретического значения максимального значения деформации e_{rr} при различных значениях зазора между плоскими участками элемента, подогнутого до 180° (h).

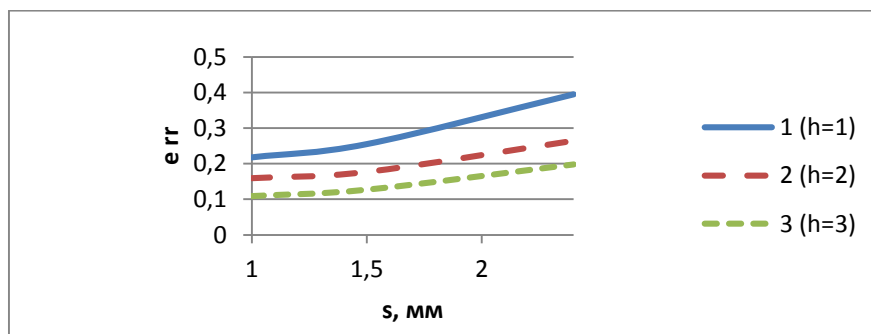


Рис. 5.–Результаты расчета максимальных значений e_{rr}

Сверка результатов теоретического анализ на ПК методом конечных элементов. Для проверки и уточнения полученных в ходе теоретического

анализа распределений деформаций при процессе формообразования профилей с элементами изгиба до 180° использовался программный комплекс Deform 3D компании SFTC. Данный комплекс является средством для моделирования процессов обработки металлов давлением методом конечных элементов.

В ходе моделирования процесса были заданы следующие условия его протекания: коэффициент трения (сталь о сталь) 0,12; температура окружающей среды, заготовки и оснастки 20°C ; число конечных элементов модели заготовки 150000; скорость движения пуансона – 10 мм/с; число шагов симуляции на каждом этапе – 100.

Моделирование проводилось в три этапа: подгибка до 90° в специальной оснастке, подгибка до 120° в специальной оснастке, подгибка до 180° на плоских бойках. На каждом этапе производилась замена моделей инструмента и перерасчитывались межэлементные связи.

Полученные в ходе моделирования распределения деформаций приведены на рис. 6–8.

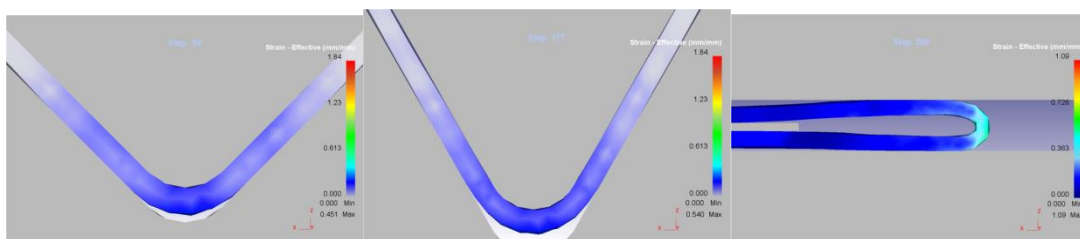


Рис. 6 – Модель распределения деформаций при изгибе до углов 90° , 120° и 180° при $r=s$

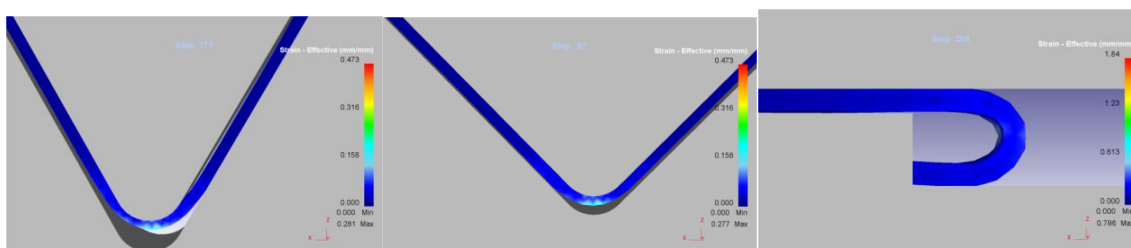


Рис. 7 – Модель распределения деформаций при изгибе до углов 90° , 120° и 180° при $r=2s$

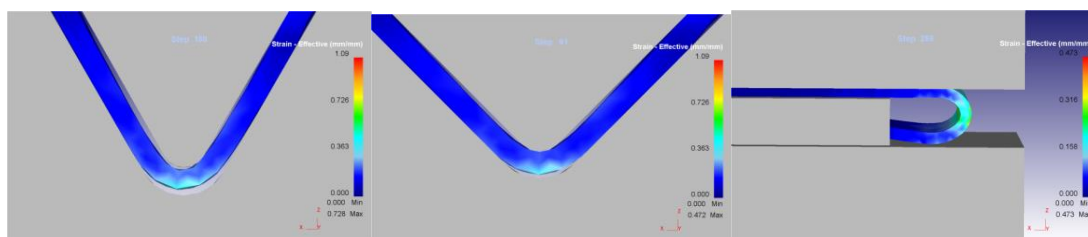


Рис. 8 – Модель распределения деформаций при изгибе до углов 90° , 120° и 180° при $r=3s$

Приведенные на рис. 6–8 распределения деформаций согласуются полученными ранее теоретическими графиками распределения деформаций (рис. 3, 4), показывая максимальную деформацию при $\varphi = 0^\circ$.

Сопоставление данных, полученных в ходе теоретического расчета и результатов моделирования процесса в программном комплексе Deform 3D приведено в табл. 1.

Таблица 1 – Сравнение теоретического расчета по зависимости и результатов моделирования по максимальному значению утонения

h, мм	Толщина образца, мм	Теоретическое значение $\epsilon_{гр}$	Значение $\epsilon_{гр}$ согласно расчету в Deform 3D, мм/мм	Величина расхождения	
				абсолютная, мм	относительная, %
1	1	0,22	0,215	0,005	2,3
2		0,16	0,164	-0,004	2,5
3		0,11	0,114	0,01	3,6

Таким образом, проверка полученных результатов теоретического анализа методом конечных элементов высокую степень схождения результатов (максимальное расхождение не превышает 3,6%).

Выводы:

1. Получены теоретические зависимости для описания деформированного состояния в очаге деформации профилей с элементами изгиба до 180° .
2. Выполнен конечно-элементный анализ на основе компьютерного моделирования процесса, произведено сопоставление результатов теоретических исследований с цифровой моделью, установлено незначительное расхождение, не превышающее 4%.

Список литературы: 1. Тришевский И.С. Исследование деформаций металла при пластическом изгибе на 180° / И.С. Тришевский, В.П. Стукалов // Теория и технология производства гнутых профилей проката. Сборник трудов. Выпуск XV.–Харьков, изд-во УкрНИИМет, 1970. 2. Тришевский И.С. Исследование влияния утонения на напряженно-деформированное состояние металла полосы в месте изгиба и изменение ширины заготовки при профилировании / И.С. Тришевский, Ю.Н. Алексеев и В.М. Щеглов // Теория и технология производства гнутых профилей проката. Сборник трудов. Выпуск XV.–Харьков, изд-во УкрНИИМет, 1970. 3. Алексеев Ю.Н. Вопросы пластического течения металлов.– Харьков: изд-во ХГУ, 1958. – 188 с. 4. Алексеев Ю.Н. Введение в теорию обработки металлов давлением, прокаткой и резанием.– Харьков: изд-во ХГУ, 1958. – 188 с. 5. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. 3-е изд. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 285 с. 6. Гун Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением. Учебное пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1983.–285 с. 7. Седов Л.И. Механика сплошной среды: В 2 т. т. 1 – 4-е изд. – М.: Наука, 1983. – 540 с. 8. Плещенцов С.Ю. Моделирование изгиба металла на 180° и исследование его деформированного состояния с использованием цифровых методов.–Вісник НТУ «ХПІ».. – Х. : НТУ «ХПІ», 2009. – № 15 (948).

Bibliography (transliterated): 1. *Trishevskij I.S.* Issledovanie deformatsij metalla pri plasticheskom izgibe na 180° / I.S. Trishevskij, V.P. Stukalov // Teorija i tehnologija proizvodstva gnutyh profilej prokata. Sbornik trudov. Issue XV.–Kharkiv, UkrNIIMet, 1970. 2. *Trishevskij I.S.* Issledovanie vlijanija utonenija na naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie metalla polosy v meste izgiba i izmenenie shiriny zagotovki pri profilirovanii / I.S. Trishevskij, Ju.N. Alekseev, V.M. Shheglov // Teorija i tehnologija proizvodstva gnutyh profilej prokata. Sbornik trudov. Issue XV.–Kharkiv, UkrNIIMet, 1970. 3. *Alekseev Ju.N.* Voprosy plasticheskogo techenija metallov. – Kharkiv: HGU, 1958. – 188 p. 4. *Alekseev Ju.N.* Vvedenie v teoriju obrabotki metallov davleniem, prokatkoj i rezaniem. – Kharkiv: HGU, 1958. – 188 p. 5. *Il'jushin A.A.* Mehanika sploshnoj sredy. 3rd ed. – Moscow: MGU, 1990. – 285 p. 6. *Gun G.Ja.* Matematicheskoe modelirovanie processov obrabotki metallov davleniem. Uchebnoe posobie dlja vuzov. – Moscow: Metallurgija, 1983. – 285 p. 7. *Sedov L.I.* Mehanika sploshnoj sredy: in 2 volumes, vol. 1 – 4-th ed. – Moscow: Nauka, 1983. – 540 p. 8. *Plesnecov S.Ju.* Modelirovanie izgiba metalla na 180° i issledovanie ego deformirovannogo sostojanija s ispol'zovaniem cifrovyh metodov.–Visnik NTU «KhPI».. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2009. – N 15 (948).

Поступила (received) 06.11.2015

УДК. 621.7.044

Р. Г. ПУЗЫРЬ, канд. техн. наук, доц., КрНУ, Кременчуг

РАСЧЕТ КОМПОНЕНТ ТЕНЗОРА НАПРЯЖЕНИЙ НА РАДИУСЕ ЗАКРУГЛЕНИЯ ПРОФИЛИРУЮЩЕГО РОЛИКА ПРИ РАДИАЛЬНО-РОТАЦИОННОМ ПРОФИЛИРОВАНИИ ОБОДЬЕВ КОЛЕС

Рассматриваются вопросы определения поля напряжений при формоизменении ободьев колес из стальных заготовок на первом переходе радиально-ротационного профилирования. Интерес представляет определение напряжений на радиусе закругления профилирующего ролика, так как именно места сопряжений различных элементов профиля обода испытывают во время эксплуатации наибольшие нагрузки. Результаты теоретического исследования позволяют анализировать возникающие в процессе деформирования напряжения и определять совокупность технологических и конструкторских параметров процесса профилирования, которые оказывают значительное влияние на величину и распределение нормальных и касательных напряжений.

Ключевые слова: обод, профилирование, заготовка, радиус закругления, деформация.

Введение. Одним из определяющих технологических параметров процесса профилирования ободьев колес является минимально допустимая толщина металла в местах радиусных переходов профиля, поэтому толщину заготовки необходимо выбирать такой, чтобы это условие было выполнено, и одновременно не допустить утяжеления ободьев изначально ее завывсив.

Анализ последних исследований и литературы. Как показывают исследования по теории и эксперименту радиально-ротационного профилирования [1–3], а также расчеты на прочность обода колеса во время эксплуатации [4, 5], наибольший интерес вызывают публикации, направленные на установление поля напряжений и деформаций, действующих на радиусах