

пряжения в центре и ниже на поверхности во внеконтактной области на входе в очаг деформации. При многовалковой прокатке существенную роль играет большая площадь контактной поверхности на протяжении всего очага деформации, что снижает величину действующих растягивающих внеконтактных напряжений.

Полученные результаты могут быть полезны при проектировании новых более эффективных систем калибров и разработке нетрадиционного подхода к проектированию калибровок валков проволочных станков с учетом НДС в очаге деформации.

**Список литературы:** 1. Смирнов В.К., Шилов В.А., Инарович Ю.В. Калибровка прокатных валков: Учебное пособие для вузов. – М.: Теплотехник. - 2008. - 490 с. 2. Филиппов Э.Л., Клименко В.М. Изучение напряжений при прокатке высоких полос в гладких валках // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия №4. - 1973. -С 105-108. 3. Эффективность деформации сортовых профилей / Тулупов С.А., Гун Г.С., Онискив В.Д., Курдюмова В.А., Радюкевич К.Л. - М.: Металлургия. - 1990. - 280 с. 4. Деформация металла в многовалковых калибрах / Поляков М.Г., Никифоров Б.А., Гун Г.С. - М.: Металлургия. - 1979. - 240 с. 5. Прокатка малопластичных металлов с многосторонним обжатием: Учебное пособие для вузов / Барков Л.А., Выдрин В.Н., Пастухов В.В., Чернышев В.Н. - Челябинск: Металлургия, Челябинское отделение. - 1988. - 304 с. 6. Колмогоров В.Л. Механика ОМД. - М.: Металлургия. - 1986. - 687 с.

*Надійшла до редколегії 22.10.2012*

УДК 621.771.011

**Влияние калибровки валков на напряженное состояние в очаге деформации при прокатке катанки/ Харитонов В.А., Таранин И.В.** Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. - Харків: НТУ «ХПІ». - 2012. - № 46(952). - С.198-203. – Бібліогр.: 6 назв.

У статті проаналізовано напружений стан металу в осередку деформації при гарячій прокатці катанки на основі моделювання методом кінцевих елементів в середовищі програмного комплексу "DEFORM-3D". Проведено порівняльний аналіз відомих двох- і багатовалкових систем калібрів. Виявлено фактори калібрування валків, що визначають величину і характер розподілу поздовжніх розтягуючих напруг у вогнищі деформації.

In article are analyzed stress conditions of metal in deformation zone at the hot rolling of rod using finite element method by means computer simulation in program system "DEFORM-3D". The known systems of calibers are analyzed and compared. The features of roll pass design, which influence to the magnitude and distribution of the longitudinal tensile stresses in the deformation zone are determined.

УДК 621.77.014

**А. В. ГРУШКО**, канд. техн. наук, доц., ВНТУ, Вінниця

**Т. И. МОЛОДЕЦКАЯ**, аспирант, ВНТУ, Вінниця

**Р. С. ТКАЧЕНКО**, преп. науч.-метод. отдела, ВВПУ ЛГУБЖ, Вінниця

**А. В. ГУЦАЛЮК**, магистрант, ВНТУ, Вінниця

### **ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ В УСЛОВИЯХ ПОПЕРЕЧНОГО ИЗГИБА ТОЛСТОЛИСТОВОЙ ШИРОКОЙ ЗАГОТОВКИ**

Исследовано деформированное состояние заготовки при поперечном изгибе с использованием метода конечных элементов. Выявлены четыре характерных стадии изгиба, что свидетельствуют о нестационарности процесса гибки. Установлено, что наиболее управляемый технологический фактор, с точки зрения уменьшения деформации, является плечо деформаций. Результаты моделирования методом конечных элементов проверяли исследованием трехточечного изгиба широкой заготовки.

**Ключевые слова:** деформированное состояние, метод конечных элементов, поперечный изгиб, кривая течения.

Експериментально-теоретическому аналізу теорії изгиба посвящен достаточно широкий пласт научных исследований. Основной предпосылкой при таком анализе является гипотеза плоских нормалей, ставящая в однозначную зависимость продольные де-

формации с радиусом изгиба [1]. Данная гипотеза хорошо подтверждается экспериментом при гибке заготовок моментом или усилием при больших плечах по отношению к

© А. В. Грушко, Т. И. Молодецкая, Р. С. Ткаченко, А. В. Гупалюк, 2012

толщине заготовки. Однако, при гибке усилием на малые радиусы и при плечах усилия, соизмеримыми с толщиной стенки заготовки (толстолистовая гибка, штамповка) наблюдается невыполнение данной гипотезы, что может привести к существенной погрешности при расчетах напряженно-деформированного состояния и, как следствие, к технологическим отказам в виде трещин и нарушения предполагаемой геометрии заготовок.

При выполнении гипотезы плоских сечений радиусы нейтральной поверхности деформаций и напряжений для упрочняющегося материала равны [2-4]

$$\rho_{0\varepsilon} = \sqrt{\frac{R^2 + r^2}{2}}, \quad \rho_{0\sigma} = \sqrt{Rr}.$$

В результате, продольные логарифмические деформации на внешней поверхности, в вершине изгиба, с учетом гипотезы плоских сечений

$$e_{\theta R} = \ln \frac{R \cdot d\theta}{\rho_{0\varepsilon} \cdot d\theta} = \ln \frac{R}{\sqrt{\frac{R^2 + r^2}{2}}}.$$

При плоском деформированном состоянии, с учетом условия несжимаемости  $e_1 = -e_3, e_2 = 0$ , тогда интенсивность накопленных деформаций составит  $e_i = 0,15e_1$  или  $e_i = e_{iR} = 0,15e_{\theta R}$ .

При изгибе, в процессе формоизменения уменьшается толщина стенки заготовки  $s$ , что становится существенным при малых радиусах изгиба (коэффициент утонения стенки  $k_s = s / s_0$  может достигать 0,7 и менее). В результате радиус внешней поверхности в процессе изгиба будет определяться через радиус внутренней поверхности

$$R \approx r + s \text{ и, при } r = R_1 \rightarrow R \approx R_1 + s_0 k_s,$$

где  $k_s$  - коэффициент утонения стенки  $k_s = s / s_0$ .

Следовательно, при выполнении гипотезы плоских сечений можно приблизительно оценить продольные деформации в вершине изгиба, по которым, в большинстве случаев и оценивается деформируемость заготовки

$$e_{\theta R} = \ln \frac{R \cdot d\theta}{\rho_{0\varepsilon} \cdot d\theta} \approx \ln \frac{R_1 + s_0 k_s}{\sqrt{\frac{(R_1 + s_0 k_s)^2 + r^2}{2}}}. \quad (1)$$

Сложность непосредственного использования данной зависимости состоит в неопределенности коэффициента  $k_s$ , зависящего от относительного радиуса и угла гибки. Кроме этого внешний радиус лишь приближенно равен  $R \approx r_o + s_0 k_s$ , поскольку формируется в результате пластического течения металла при приближенности гипотезы плоских сечений.

Гораздо стабильнее результаты расчета величины продольных деформаций, если известен внешний радиус поверхности заготовки, которая свободна от контактных напряжений, тогда

$$e_{\theta R} = \ln \frac{R}{\sqrt{\frac{R^2 + (R - s_0 k_s)^2}{2}}} \quad (2)$$

Однако, как показывают результаты исследований [5] при малых плечах деформаций формулы (1) и (2) дают существенно различные результаты, которые могут отличаться от действительных более чем в 2 раза в сторону занижения. Кроме того, деформации и их распределение существенно зависят от плеча и угла гибки, что вышеприведенные зависимости не учитывают.

**Целью работы** является анализ деформированного состояния толстолистовой широкой заготовки при поперечном изгибе.

В дальнейшем, рассмотрим простейший вариант гибки - трехточечный изгиб широкой заготовки, ограничиваясь, таким образом, плоским деформированным состоянием [6]. Основные параметры и схема заготовки показаны на рис 1.

Зададимся постоянным для всех случаев моделирования соотношением  $s_0 = 2R_2 = 20$  мм. Радиус оправки  $R_1$  будем варьировать в пределах  $0,2 s_0$  до  $1 s_0$  (4...20 мм). Плечо деформирующей силы  $L$  будем варьировать от минимально возможного, позволяющего заготовке изгибаться на угол догибки в  $\alpha = 90^\circ$ , т.е.  $L_{min} = s + R_1 + R_2$ , до максимального, когда влиянием касательных напряжений от поперечной силы можно пренебречь и выполняется гипотеза плоских сечений - по результатам моделирования  $L_{max} \approx 4,5s$ . Таким образом  $0,2 \leq \bar{R} \leq 1$ ;  $1,7 \leq \bar{L} \leq 5$ , где  $\bar{R}_1 = R_1 / s_0$ ,  $\bar{L} = L / s_0$  - относительные радиусы оправки и плеча деформирующей силы.

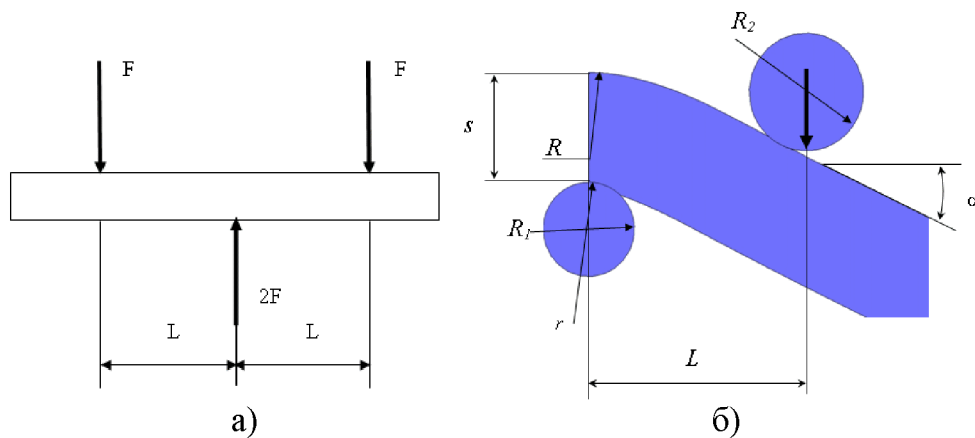
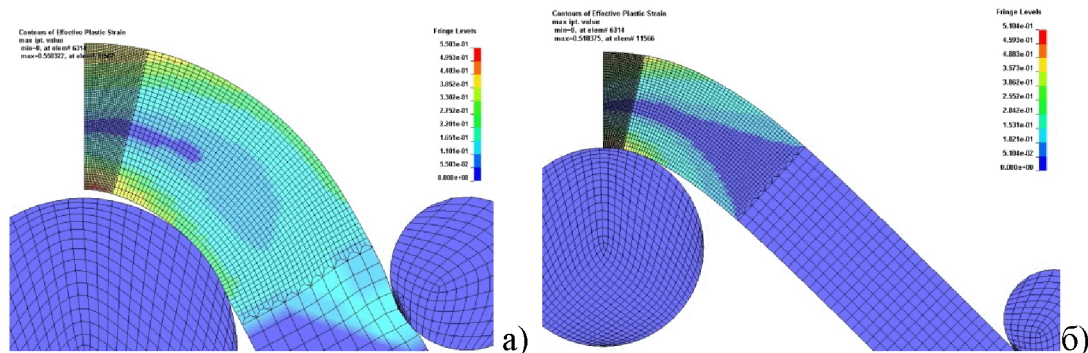
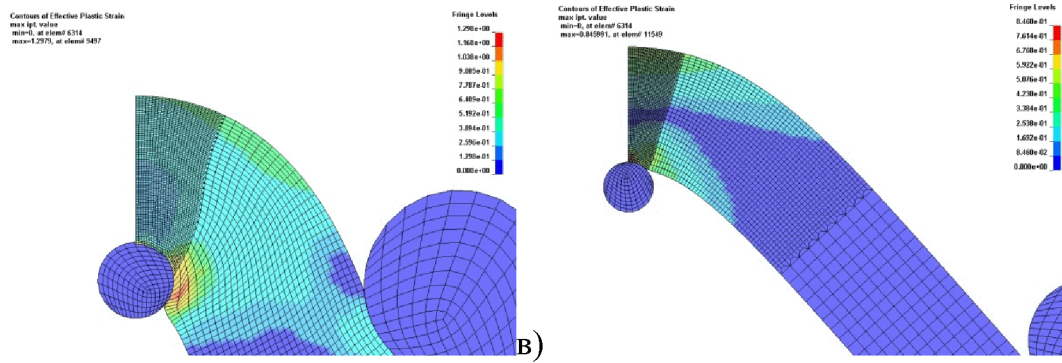


Рис. 1 – Схема трехточечного изгиба широкой заготовки:  
а - расчетная схема; б - заготовка





а)  $\bar{R}_1 = 1, \bar{L} = 2,5$ ; б)  $\bar{R}_1 = 1, \bar{L} = 4,5$ ; в)  $\bar{R}_1 = 0,2, \bar{L} = 1,7$ ; г)  $\bar{R}_1 = 0,2, \bar{L} = 4,2$

Рис. 2 – Распределение интенсивности деформаций, полученное моделированием изгиба методом конечных элементов при различных геометрических соотношениях:

При изгибе толстых листов образуется обширный очаг неравномерной деформации, изменяющий свои качественные характеристики в процессе формообразования.

Сложности теоретического анализа ставят задачу в разряд трудноразрешимых как в напряжениях так и деформациях. Отметим основные из них:

а) Выбор системы координат. В вершине угла гибки, в области, близкой к плоскости симметрии поперечные сечения практически не искривляются, что дает предпосылки к использованию цилиндрической системы координат. При некотором удалении от плоскости симметрии сечения искривляются за счет касательных напряжений, направление которых ориентировано по поперечной силе при отсутствии изгибающего момента. Для удобства такого анализа следовало бы воспользоваться декартовой системой координат. В результате заготовка в процессе формообразования имеет переменные радиусы кривизны по очагу деформаций и различную степень искривления поперечных рисок (см. рис. 2).

б) Нестационарность процесса. За счет упрочняемости очаг деформаций практически на протяжении всего процесса находится в пластическом состоянии и переходит в стационарную стадию при углах загиба заготовки более 50 градусов (иногда до 80-90), смещаясь по радиусу гибки. Причем большие плечи гибки соответствуют большим углам перехода в стационарное состояние. Т.е. гибка происходит преимущественно в нестационарных условиях.

в) Интегрируемость дифференциальных уравнений. Совместное решение уравнений равновесия с условиями пластичности в квадратурах практически сложно разрешимо, и на сегодняшний день пока не найдено, что вызывает необходимость использования экспериментально-расчетных и численных методов.

Условия равновесия [2]

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} = 0$$

Условие пластичности с упрочнением по степенному закону  $\sigma_i = A e_i^n$

г) Немонотонность деформации. При изменяющемся радиусе изгиба радиус нейтральной поверхности деформаций и напряжений не совпадают, перемещаясь к внутренней поверхности изгиба заготовки. Появляется зона немонотонной деформации, для кор-

ректного описания которой следовало бы пользоваться теориями кинематического упрочнения материала Бакхауза или Ильюшина [7], что еще больше усложняет теоретический анализ.

Отметим, что практической стороны наиболее важным является не получение полей напряжений и деформаций по всему очагу деформаций, а оценка максимальных деформаций в опасной, с точки зрения разрушения, зоне. Эта зона находится в вершине изгиба заготовки, в плоскости симметрии. [5]. Показатель жесткости напряженного состояния (по Бабичкову [8]) в этой области практически постоянен и равен  $\eta = 3\sigma_0 / \sigma_i = 1,73$ , вне зависимости от геометрических параметров гибки. Таким образом, в дальнейшем, будем исследовать зависимости максимальных накопленных деформаций и геометрии заготовки от указанных исходных параметров.

Воспользуемся МКЭ, как наиболее информативным, гибким и достаточно точным для анализа деформированного состояния при изгибе заготовки усилием [5]. Моделируем половину симметричной заготовки, удовлетворяя граничные условия. Задавались следующими значениями характеристик материала заготовки: коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ , модуль Юнга  $E = 210$  ГПа, коэффициент трения между инструментом и заготовкой по Кулону  $f = 0,1$ . Кривую течения задавали в виде степенной функции  $\sigma_i = A(e_0 + e_i)^n$ . Используем плоскую постановку задачи – плоское деформированное состояние. Деформированное состояние заготовки слабо зависит от свойств металла, что подтверждается, в том числе проведенным моделированием, поэтому варьировали только величины  $\bar{R}$  и  $\bar{L}$ .  $\bar{R}$  – с интервалом 0,1 и  $\bar{L}$  с интервалом 0,25 в диапазонах  $0,2 \leq \bar{R} \leq 1$ ;  $1,7 \leq \bar{L} \leq 5$ .

В результате моделирования выявлены 4 характерные стадии изгиба заготовки (рис. 3, 4):

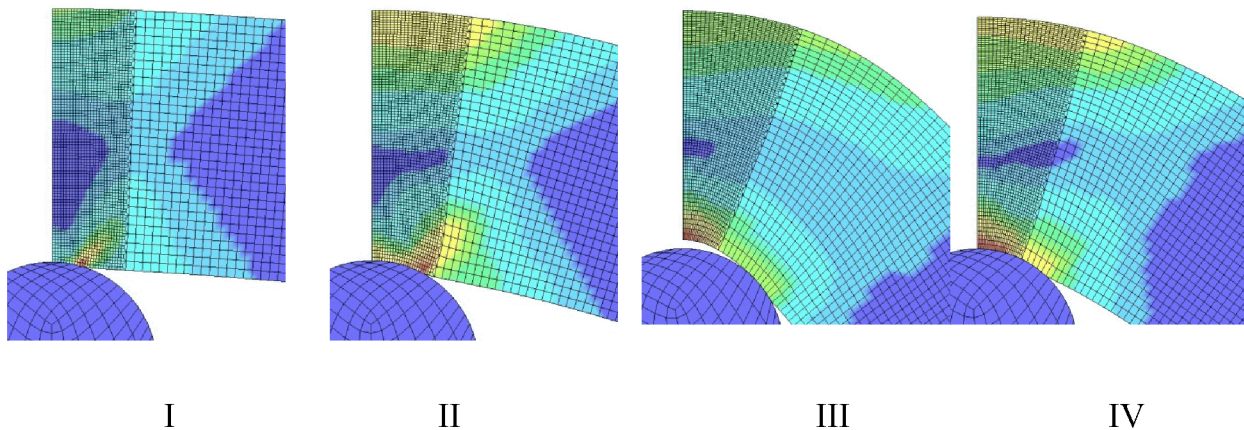


Рис. 3 – Стадии изгиба заготовки:

I – начальная, II – нестационарная, III – стационарная, IV – стадия догибки.

I. Начальная стадия. Формируется очаг деформации изгиба с переменным, в зависимости от угла подгибки, внутренним радиусом, который больше радиуса оправки  $r > R_1$ . Деформации в вершине изгиба, как правило, относительно небольшие и не превышают половины максимальных. Угол подгибки начальной стадии зависит от соотношения геометрических параметров, составляя величину 3-7 градусов. Внешний радиус уменьшается с увеличением угла подгибки.

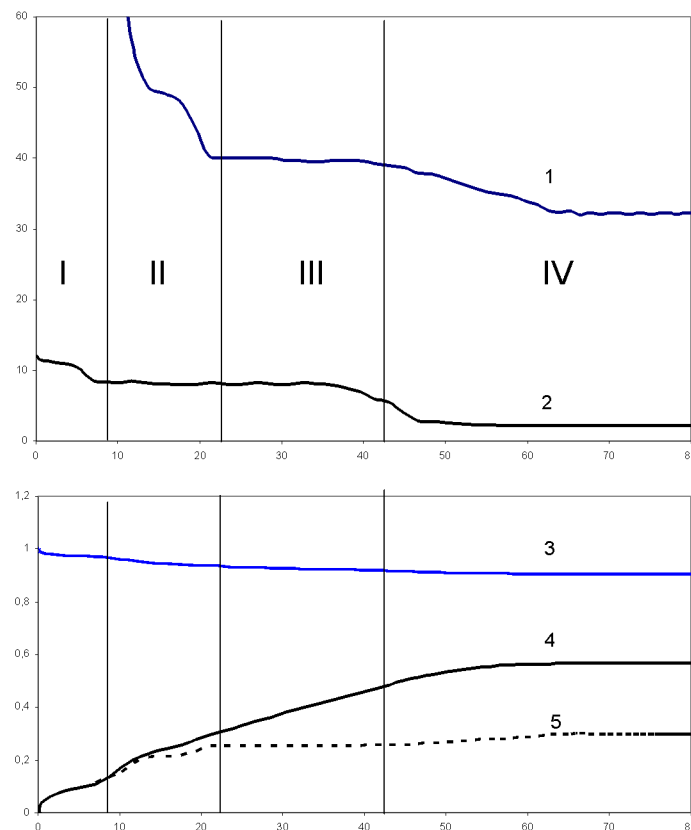


II. Нестационарная стадия. Развитие очага деформации происходит при постоянном внутреннем радиусе заготовки, который практически равен радиусу оправки  $r \approx R_1$ . Деформации в вершине изгиба при этом практически линейно зависят от угла подгибки. Внешний радиус линейно уменьшается с увеличением угла подгибки.

III. Стационарная стадия. Очаг деформаций существенно смещается от плоскости симметрии гiba по радиус-вектору. Внутренний и внешний радиусы практически не зависят от угла подгибки. Деформации в вершине изгиба имеют линейный характер в зависимости от угла подгибки.

IV. Стадия догибки. Характеризуется отрывом внутренней поверхности заготовки в плоскости симметрии. Происходит дальнейшее деформирование металла, пребывавшего в стационарной стадии – в плоскости симметрии. Наблюдаются нелинейные зависимости деформаций и радиусов внутренней поверхности заготовки от угла подгибки. Последний становится меньше радиуса оправки  $r < R_1$ . Внешний радиус нелинейно уменьшается с увеличением угла подгибки. Стадия догибки, по отношению к деформированному состоянию в плоскости симметрии, также может быть разделена на нестационарную и стационарную. Переход в стационарную стадию характеризуется постоянными значениями деформаций и радиусов изгиба. Угол  $\alpha_u$  при котором происходит этот переход назовем граничным. Изгиб заготовки на больший угол не вызывает прироста максимальных деформаций и изменения радиусов.

При относительно больших плечах деформирующих усилий и больших относительных радиусах изгиба 4-я стадия догибки может отсутствовать. При малых радиусах – может отсутствовать стационарная стадия



I, II, III, IV – характерные стадии гибки

Рис. 4 – Зависимость изменения наружного  $R$  и внутреннего  $R_1$  радиуса (графики 1, 2), коэффициента утонения  $k$  (график 3), интенсивности деформаций  $e_i$  (график 4) и максимальной интенсивности деформаций  $e_i = 1,15e_{0R}$  (график 5) от угла подгибки  $\alpha$

Путем статистической обработки данных методом наименьших квадратов, установлено, что зависимость максимальных накопленных деформаций от угла подгибки, для практических расчетов, достаточно точно следует эмпирической зависимости (корреляция составляет более 97%)

$$e_i = e_{iu} (1 - \exp(-q\alpha^p)), \quad (3)$$

где коэффициенты аппроксимации  $q$  и  $p$  могут быть найдены путем решения системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} e_{i1} &= e_{iu} (1 - \exp(-q \cdot 45^p)) \\ 0,95e_{iu} &= e_{iu} (1 - \exp(-q \cdot \alpha_u^p)) \end{aligned} \right\}$$

где  $e_{i1}$  - деформация в вершине изгиба заготовки, при угле подгибки  $45^\circ$ , которому соответствует изгиб исходной заготовки на  $90^\circ$ ,  $0,95e_{iu}$  - условное значение деформации, соответствующее углу  $\alpha_u$  при ошибке аппроксимации 5%, поскольку, согласно по выражению (3)  $e_i = e_{iu}$  при  $\alpha = \infty$ .

Результаты сопоставительного анализа представлены на рис. 5.

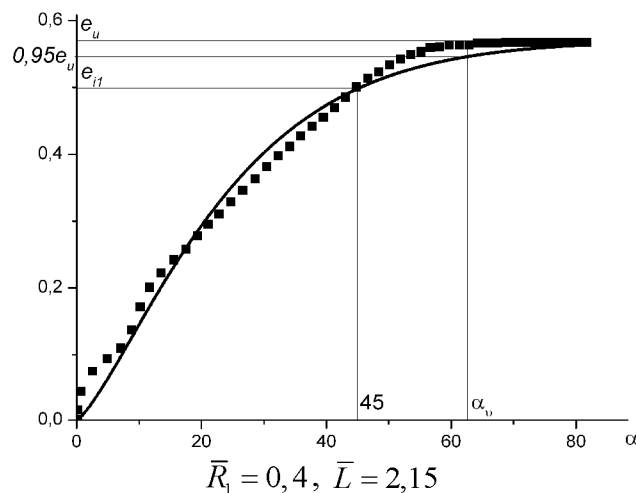


Рис. 5 – Зависимость распределения степени накопленной деформации в вершине места изгиба от угла подгибки. Точками показаны расчетные данные, сплошная кривая – аппроксимация по зависимости (3)

С помощью регрессионного анализа подобраны аппроксимирующие функции  $e_{i1}$ ,  $e_{iu}$  и  $\alpha_u$  для исследованной области влияющих факторов  $0,4 \leq \bar{R} \leq 2$ ;  $1,7 \leq \bar{L} \leq 5$ . Оказалось, что достаточную точность расчета обеспечивают полиномиальные функции

$$e_{i1} = a_0 + a_1\bar{R} + a_2\bar{L} + a_3\bar{R}^2 + a_4\bar{L}^2 + a_5\bar{R}\bar{L}, \pm 6\%, \quad (4)$$

$$e_{iu} = b_0 + b_1\bar{R} + b_2\bar{L} + b_3\bar{R}^2 + b_4\bar{L}^2 + b_5\bar{R}\bar{L}, \pm 10\% \quad (5)$$

$$\alpha_u = c_0 + c_1\bar{R} + c_2\bar{L} + c_3\bar{R}^2 + c_4\bar{L}^2 + c_5\bar{R}\bar{L} \text{ (в градусах)}, \pm 10\% \quad (6)$$

для интервала  $0,2 \leq \bar{R} \leq 0,7$

$$e_{i1} = d_0 + d_1\bar{L} + d_2\bar{L}^2 + d_3\bar{L}^3, \pm 4\%, \quad (7)$$

Таблица – Коэффициенты аппроксимации.

$i$	$d_i$	$b_i$	$c_i$	$a_i$
0	-1,235	-0,489	-40,33	0,036
1	1,638	-0,269	-28,69	-0,022
2	-0,485	0,955	91,92	0,339
3	0,045	0,0218	1,005	-0,047
4		-0,154	-14,57	-0,063
5		0,0195	3,709	0,031

С целью проверки предложенных зависимостей проведены испытания заготовки прямоугольной формы из стали У8 (рис.6). Деформированное состояние в вершинах изгиба изучалось методом делительных сеток и обрабатывалось по методике Ренне И.П. [3]. Погрешность определения деформаций по выражению (4) составляет не более 6%, что дает основания к его практическому использованию.

Особый интерес представляет исследование данного выражения на экстремум, с целью выявления наиболее опасных сочетаний геометрических параметров, приводящих к максимальной деформации, и к возможному разрушению.

Назовем критическими относительный радиус и относительное плечо деформирующей силы, когда они приводят к возникновению максимальной деформации в вершине изгиба.

Приравнявая частные производные по соответствующим аргументам к нулю, получим выражения критических величин  $\bar{R}_{cr}$ ,  $\bar{L}_{cr}$  (8).

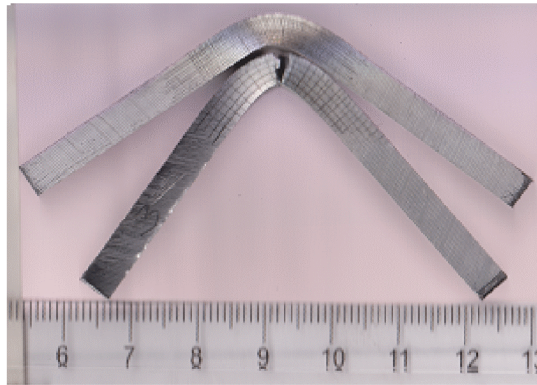


Рис. 6 – Образцы из стали У 8 после испытаний по схеме трехточечного изгиба

$$\frac{\partial e_{i1}}{\partial \bar{R}} = a_1 + 2a_3\bar{R}_{cr} + a_5\bar{L} = 0; \quad \frac{\partial e_{i1}}{\partial \bar{L}} = a_2 + 2a_4\bar{L}_{cr} + a_5\bar{R} = 0,$$

откуда

$$\bar{R}_{cr} = -\frac{a_1 + a_5\bar{L}}{2a_3}, \quad \bar{L}_{cr} = -\frac{a_2 + a_5\bar{R}}{2a_4}.$$

Отметим, что для диапазона  $0,2 \leq \bar{R} \leq 0,7$  (7), критическое плечо  $\bar{L}_{cr}$  слабо зависит от относительного радиуса и находится в пределах  $2,8 \leq \bar{L}_{cr} \leq 3,1$  (рис.7). Полученные результаты позволяют сформулировать следующие практические рекомендации: при гибке малопластичных металлов, для уменьшения вероятности разрушения, следует избегать указанного диапазона, стремясь к конструктивно возможному минимуму или максимуму величины  $\bar{L}$ ;  $L$  более, чем на 5 толщин стенки не следует увеличивать).



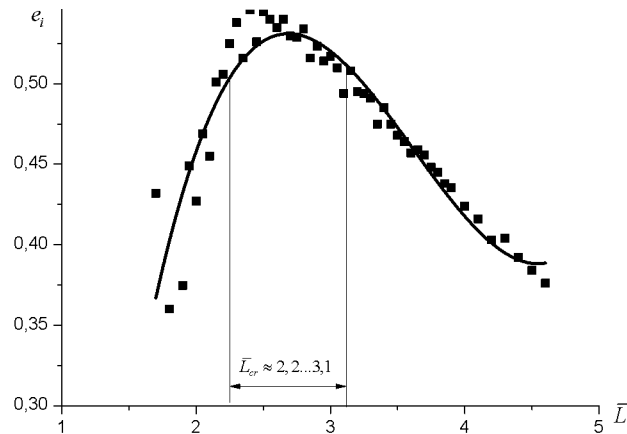


Рис. 7 – Залежність максимальних деформацій від відносительного плеча деформацій при  $0,2 \leq \bar{L} \leq 0,7$

**Выводы.** 1. При поперечном изгибе на малые радиусы, при плечах деформаций менее 5 толщин стенки заготовки, нарушается гипотеза плоских сечений. Неучет этого фактора приводит к существенной погрешности в расчет напряженно-деформированного состояния заготовки в процессе ее формообразования.

2. Выявлены 4 характерные стадии изгиба, позволяющие в целом сделать вывод о нестационарности процесса гибки. Для данных геометрических соотношений существует предельная степень накопленной деформации в вершинегиба, достигаемая при определенном угле подгибки. Эти величины могут быть положены в основу построения модели зависимости деформаций от угла подгибки в течении всего процесса формоизменения, которую предложено аппроксимировать экспоненциальной функцией.

3. Для любого угла гибки существует критическое значение плеча деформаций, при котором наблюдаются максимальные деформации. Критическое плечо мало зависит от относительного радиуса оправки в пределах  $0,2 \leq \bar{R} \leq 0,6$  и составляет 2,5. При штамповке малопластичных металлов следует избегать попадания в интервал  $2,2 \leq \bar{L} \leq 3,1$ . Плечо деформаций может являться управляемым технологическим фактором. При испытании металлов на разрушение в условиях трехточечного изгиба, наоборот, следует стремиться к оптимальным значениям  $2,2 \leq \bar{L} \leq 3,1$ , что уменьшит габариты испытательного штампа.

4. Наиболее эффективным способом уменьшения деформаций является предельное, с точки зрения конструктивных соображений, уменьшение плеча  $\bar{L}$ . По сравнению с максимальным для данного угла подгибки, деформации могут быть уменьшены до 2 раз.

5. Максимальная величина накопленных деформации в условиях плоского изгиба, согласно проведенных расчетов и построенной модели в исследованных пределах составляют 0,8...0,9, реализуемая при малых относительных радиусах изгиба и больших плечах деформирующей силы.

6. Данные работы могут быть использованы при конструировании испытательных штампов для трехточечного изгиба и при проектировании технологических процессов изгиба толстолистовых заготовок на малые радиусы.

**Список литературы:** 1. Евстратов В. А. Теория обработки металлов давлением: Учебник для вузов по спец. "Машины и технология обраб. металлов давлением" / В. А. Евстратов: - Харьков Вища школа Изд-во при Харьк. ун-те 1981. - 248 с. 2. Сторожев М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В.Сторожев, Е.А. Попов. - М.: Машиностроение, 1977. - 423с 3. Ренне И.П. Пластический изгиб листовой заготовки / И.П. Ренне // Труды Тульского механического института. - вып.4. - М.: Оборонгиз, 1950. -С.23-28. 4. Хилл Р. Математическая теория пластичности / Р. Хилл -М.: Издатель-

ство иностранной литературы, 1955. - 328с. 5. Грушко О. В. Моделирование змiцнення матеріалу в процесі штампування z-подібних заготовок / О. В. Грушко, Т. І. Молодецька // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – 2012. – № 1 (30). – С. 31–37. 6. Грушко О.В. Особливості товстолистового штампування за схемою згину та зсуву / О.В. Грушко, Т.І. Молодецька // Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування. – 2011. - №62. – С.193-197. 7. Ильющин А.А. Пластичность / А.А. Ильющин – М.: Изд. АН СССР, 1963. – 375 с. 8 Огородников В.А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении: Учеб.пособие / В.А. Огородников. – К.: УМК ВО, 1989. – 152 с.

Надійшла до редколегії 23.10.2012

УДК 621.77.014

**Деформированное состояние в условиях поперечного изгиба толстолистовой широкой заготовки / Грушко А.В., Молодецкая Т.И., Ткаченко Р.С., Гуцалюк А.В. // Вестник НТУ «ХПИ». Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №46(952) .- С. © А. В. Грушко, Т. И. Молодецкая, Р. С. Ткаченко, А. В. Гупалюк, 2012 203-212. – Бібліогр.:8 назв.**

Досліджено деформований стан заготовки при поперечному згині з використанням методу кінцевих елементів. Виявлені чотири характерні стадії згину, що свідчать про нестационарність процесу гнуття. Встановлено, що найбільш керівний технологічний фактор, з точки зору зменшення деформації, є плече деформації. Результати моделювання методом кінцевих елементів перевіряли дослідженням трьох точкового згину широкої заготовки.

**Ключові слова:** деформований стан, метод кінцевих елементів, поперечний згин, крива течії.

Researched of deformation of the workpiece during bending using the finite element method. Detected four characteristics under bending, indicating unsteadiness bending process. Found that most leading technological factor, in terms of reducing the strain is shoulder strain. Simulation results finite element study tested three point bending broad piece.

**Keywords:** deformed state, finite element method, transverse bending, flow curve.

УДК 621.73.06-52

**О. А. КОВАЛЕНКО**, ст. преподаватель, ДонГТУ, Алчевск  
**П. В. БОРОВИК**, канд. техн. наук, доц., ДонГТУ, Алчевск

## **АНАЛИЗ ИСХОДНОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ИНСТРУМЕНТА ПРИ УПРОЧНЕНИИ ВАНАДИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ**

В результате обработки экспериментальных данных по определению качества поверхностных слоев стали У8А, упрочненной электроискровым легированием, получены зависимости механических свойств упрочненной поверхности, глубины, слоя от исходной шероховатости поверхности до нанесения покрытия. При проведении моделирования напряженно - деформированного состояния рабочих кромок разделительных штампов методом конечных элементов получены зависимости напряжений, возникающих на поверхности режущих кромок разделительных штампов при различной исходной шероховатости.

**Ключевые слова:** шероховатость поверхности, напряженно-деформированное состояние, микротвердость, модуль нормальной упругости, упрочнение электроискровым легированием, глубина слоя.

**Введение.** Достижение высокой прочности и износостойкости поверхности рабочих деталей штампов в большой степени зависит от исходных свойств поверхностных слоев, сформированных при их изготовлении с помощью упрочняющих технологий, в частности методами электроискрового легирования.

Одним из факторов, определяющих стойкость инструмента, принято считать в первую очередь микротвердость упрочненной поверхности, которая непосредственно зависит от микроструктуры слоя. Кроме того, в процессе эксплуатации существенное влияние на процессы изнашивания оказывает и шероховатость полученной поверхности (особенно на первых этапах приработки инструмента). Общеизвестным считается тот факт, что шероховатость обработанной поверхности должна быть как можно меньше [1, 2 и др.]. Однако в работах [3, 4] авторами рассматривается вопрос о спе-