

УДК 621.77

Ю. А. ПЛЕСНЕЦОВ, Т. А. ДЖОРУБОВ, А. Г. КРЮК

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ МИНИМАЛЬНЫХ РАДИУСОВ МЕСТ ИЗГИБА ПРИ ВАЛКОВОЙ ФОРМОВКЕ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

Возрастающие требования к качеству гнутых профилей из сталей различных марок поставили задачу правильной оценки прочностных и пластических свойств материала. Вопрос о разрушении материала в процессе профилирования (о минимальных допустимых радиусах мест изгиба) долгое время решали, базировавшись на показателе относительного удлинения  $\delta_{10}$ . Однако, в дальнейшем, было доказано, что более точной оценкой следует считать показатель пластичности материала – относительное поперечное сужение  $\psi_{ш}$ . Методом механики сплошных сред с использованием поля скоростей перемещений определена удельная работа деформирования элементарного объема места изгиба при профилировании. В работе установлено, что удельная работа деформирования с уменьшением радиуса места изгиба и увеличением угла подгибки возрастает. Из сравнения удельной работы деформирования при изгибе с критической работой разрушения получен критический радиус разрушения, который для стали Ст. 3сп равен 0,16, для стали 09Г2 равен 0,27. С увеличением угла изгиба величина критического радиуса также увеличивается. Технологические радиусы мест изгиба должны отличаться от расчетных значений критического радиуса изгиба на коэффициент запаса прочности. При поштучном процессе профилирования в результате разрезки ленты перед профилегибочным станом концы полосы получают наклепанными. Кроме того, на них могут образовываться заусенцы, которые на переднем конце получают на наружной поверхности профиля, что ужесточает условия деформирования концов полосы. Экспериментальные исследования показывают, что минимальный допустимый радиус места изгиба для наклепанного металла должен быть в 1,7÷2 раза больше, чем для отожженного.

**Ключевые слова:** место изгиба, радиус, минимальный, допустимый, пластичность, материал, формоизменение, метод конечных элементов.

Зростаючі вимоги до якості гнутих профілів зі сталей різних марок поставили завдання правильної оцінки міцності і пластичних властивостей матеріалу. Питання про руйнування матеріалу в процесі профілювання (щодо мінімальних допустимих радіусів місць згину) довгий час вирішували, базуючись на показнику відносного подовження  $\delta_{10}$ . Однак, в подальшому, було доведено, що більш точною оцінкою слід вважати показник пластичності матеріалу – відносне поперечне звуження  $\psi_{ш}$ . Методом механіки суцільних середовищ з використанням поля швидкостей переміщень визначена питома робота деформування елементарного об'єкта місця згину при профілюванні. У роботі встановлено, що питома робота деформування зі зменшенням радіуса місця згину і збільшенням кута підгинання зростає. З порівняння питомої роботи деформування при згині з критичною роботою руйнування отримано критичний радіус руйнування, який для сталі Ст. 3сп дорівнює 0,16, для сталі 09Г2 дорівнює 0,27. Зі збільшенням кута згину величина критичного радіуса також збільшується. Технологічні радіуси місць згину повинні відрізнятися від розрахункових значень критичного радіуса згину на коефіцієнт запасу міцності. При поштучному процесі профілювання в результаті розрізання стрічки перед профілезгинальним станом кінці смуги виходять наклепаними. Крім того, на них можуть утворюватися задирки, які на передньому кінці виходять на зовнішню поверхню профілю, що посилює умови деформування кінців смуги. Експериментальні дослідження показують, що мінімальний допустимий радіус місця згину для наклепаного металу повинен бути в 1,7÷2 рази більшим, ніж для відпаленого.

**Ключові слова:** місце згину, радіус, мінімальний, допустимий, пластичність, матеріал, формозміння, метод кінцевих елементів.

Increasing demands on the quality of cold-formed sections of steel of various grades set the task of correct assessment of the strength and plastic properties of the material. The issue of the destruction of the material in the profiling process (on the minimum permissible bending radii places) for a long time to decide, based on the index of elongation  $\delta_{10}$ . However, in the future, it has been proved that a more accurate estimate should be considered as indicator of plasticity – the relative transverse contraction  $\psi$ . The method of continuum mechanics using field movement speed is determined by the specific work of deformation of an elementary volume of space bending when profiling. The paper found that the specific work of deformation with decreasing bend radius and increased space hems angle increases. From a comparison of compressive deformation in bending with the critical work of destruction is received critical radius of destruction, which for steel 3 is equal to 0.16 for steel 09G2 is 0.27. With an increase in the critical angle of the bend radius also increases. Technological bend radii of seats should be different from the calculation of the critical bend radius values on the safety factor. In the process of shaping the piece as a result of cutting the ribbon to the ends of the strip section bending pitched obtained rivet. In addition, they may form burrs are obtained at the front end on the outer surface profile that is tightening all bands deformation conditions. Experimental studies show that the minimum bending radius space for cold-hardened metal should be 1,7÷2 times greater than for the annealed.

**Keywords:** place the bending radius, the minimum allowable, plasticity, material forming, finite element method.

**Введение.** Возрастающие требования к качеству гнутых профилей из сталей различных марок поставили задачу правильной оценки прочностных и пластических свойств материала. Вопрос о разрушении материала в процессе профилирования (минимальных допустимых радиусах мест изгиба) долгое время решали, базировавшись на показателе относительного удлинения  $\delta_{10}$ . Однако, в дальнейшем, было доказано [1, 2], что более точной оценкой следует считать показатель пластичности материала – относительное поперечное сужение  $\psi_{ш}$ . Исходя из оценки пластичности по  $\psi_{ш}$  были разработаны [3–7] методы определения минимальных допустимых радиусов мест изгиба. Но, так как  $\psi_{ш}$  при одноосном растяжении не равно этому показателю при двuosном растяжении [4] (что имеет место на наружной поверхности места изгиба), необходима корректировка полученных результатов. Попытки

учесть влияние схемы напряженно-деформированного состояния привели к появлению дополнительных коэффициентов, точное определение которых зачастую невозможно.

**Методика исследований.** В работе [8] показано, что критерием разрушения материалов может быть только величина, учитывающая накопление энергии в различных точках тела. Такой величиной является удельная работа деформирования единичного объема разрывного образца до разрушения. На основании условия пластичности Губера-Мизеса этот критерий можно распространить на различные схемы напряженно-деформированного состояния.

**Результаты исследований.** Для определения максимальных величин удельной работы деформирования элементарного объема (заготовки) при профилировании необходимо знать величины интенсивности скоростей деформаций  $\epsilon_i$ ,

деформацій  $e_i$ , а также интенсивности напряжений  $\sigma_i$ .

Согласно [9], поле скоростей перемещений частиц при профилировании можно описать уравнениями:

$$\vartheta_r = -\frac{\omega}{2\varphi_0} \left( r + \frac{\rho^2}{r} \right) - \frac{R_H(r^2 - R_B^2)\Delta s_{\max}}{2\rho r s_0} \cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0};$$

$$\vartheta_\varphi = \omega \frac{\varphi}{\varphi_0} r + \frac{R_H r \Delta s_{\max}}{\rho s_0} \left( \frac{3}{8} \varphi + \frac{\varphi_0}{2\pi} \sin \frac{\pi\varphi}{\varphi_0} + \frac{\varphi_0}{16\pi} \sin \frac{2\pi\varphi}{\varphi_0} \right). \quad (1)$$

Выражение для интенсивности скоростей деформации имеет вид:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\left[ \frac{\omega}{\varphi_0} \left( 1 - \frac{\rho^2}{r^2} \right) + \frac{\Delta s_{\max} R_H}{\rho s_0} \left( 1 + \frac{R_B^2}{r^2} \right) \cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^2 + \left[ \frac{4R_H \varphi_0 \Delta s_{\max} (r^2 - R_B^2)}{\rho s_0 \pi r^2} \cos^3 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \sin \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^2}, \quad (2)$$

где  $\vartheta_\varphi$  и  $\vartheta_r$  – проекции тангенциальной и радиальной составляющих скоростей перемещения частиц на соответствующие оси;

$\omega$  – угловая скорость поворота торца заготовок;

$\varphi, \varphi_0$  – текущая и конечная величина углов изгиба;

$R_H$  и  $R_B$  – наружный и внутренний радиус изгиба;

$r$  – текущая величина радиуса;

$\rho = \sqrt{R_H R_B}$  – радиус нейтрального слоя напряжений;

$s_0$  – толщина изгибаемой заготовки;

$\Delta s_{\max}$  – максимальная величина абсолютного уменьшения толщины (утонения) изогнутой заготовки;

$\varepsilon_i$  – интенсивность скоростей деформации.

Если ввести относительные величины, формула (2) примет вид:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\left[ \frac{\omega}{\varphi_0} \left( 1 - \frac{\rho_1^2}{\bar{r}^2} \right) + \frac{\eta r_H}{\rho_1} \left( 1 + \frac{r_B^2}{\bar{r}^2} \right) \cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^2 + \left[ \frac{4r_H \varphi_0 \eta (\bar{r}^2 - r_B^2)}{\pi \rho_1 \bar{r}^2} \cos^3 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \sin \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^2},$$

где  $r_H, r_B$  и  $r$  – относительные величины наружного, внутреннего и текущего радиусов;

$\eta = \frac{\Delta s_{\max}}{s_0}$  – относительное утонение.

Функция диссипации энергии  $E$  определяется выражением [10]:

$$E = \varepsilon_i \sigma_i. \quad (4)$$

Подставляя в это уравнение значение  $\varepsilon_i$  из (3), получим:

$$E = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_i \sqrt{\left[ \frac{\omega}{\varphi_0} \left( 1 - \frac{\rho_1^2}{\bar{r}^2} \right) + \frac{\eta r_H}{\rho_1} \left( 1 + \frac{r_B^2}{\bar{r}^2} \right) \cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^2 + \left[ \frac{4r_H \varphi_0 \eta (\bar{r}^2 - r_B^2)}{\pi \rho_1 \bar{r}^2} \cos^3 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \sin \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^2}, \quad (5)$$

Из выражения (5), следует, что диссипация энергии достигает максимума на наружной и внутренней поверхностях места изгиба при  $\varphi=0$ .

Подставляя значение  $\varphi=0$  в (5), получим:

$$E = \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} \sqrt{\left[ \frac{\omega}{\varphi_0} \left( 1 - \frac{\rho_1^2}{\bar{r}^2} \right) + \frac{\eta r_H}{\rho_1} \left( 1 + \frac{r_B^2}{\bar{r}^2} \right) \right]^2}. \quad (6)$$

Согласно (9), при изгибе до относительного внутреннего радиуса  $r_B > 0,05$  разрушению раньше будут подвергаться волокна наружной поверхности места изгиба. Подставляя в (6) значение  $\bar{r} = r_H$  и относительный радиус нейтрального слоя напряжений  $\rho_1 = \sqrt{r_H r_B}$  получим выражение для диссипации энергии в наиболее опасной точке наружной поверхности:

$$E = \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} \left[ \frac{\omega}{\varphi_0} \left( 1 - \frac{r_B}{r_H} \right) + \frac{\eta \sqrt{r_H}}{\sqrt{r_B}} \left( 1 + \frac{r_B^2}{r_H^2} \right) \right]. \quad (7)$$

Максимальную удельную работу деформирования элементарного объема наружной поверхности места изгиба можно получить, проинтегрировав выражение (7) по времени:

$$A_{уд} = \int_0^+ \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} \left[ \frac{\omega}{\varphi_0} \left( 1 - \frac{r_B}{r_H} \right) + \frac{\eta \sqrt{r_H}}{\sqrt{r_B}} \left( 1 + \frac{r_B^2}{r_H^2} \right) \right] dt. \quad (8)$$

В этом выражении  $\sigma_i, r_B, r_H$  и  $\eta$  взаимосвязаны и зависят от времени  $t$ . Проинтегрировать выражение (8) в общем виде не представляется возможным, поэтому, для определения величины удельной работы деформирования, был применен метод приближенного вычисления.

При определении деформаций на наружной и внутренней поверхностях места изгиба [9] весь процесс изгиба до относительного внутреннего радиуса  $r_B$  был разбит на  $n$  интервалов и определено среднее значение интенсивности скоростей деформаций  $\varepsilon_{i\text{ср}}$ , действующей в данном интервале, и приращение деформаций за интервал.

Согласно (8) аппроксимацию кривых  $\sigma_i - \varepsilon_i$  производим степенной функцией. При этом:

- на участке, где  $e \leq 0,4$ ,

$$\sigma_i = B_1 e_i^m, \quad (9)$$

- на участке, где  $e \geq 0,4$ ,

$$\sigma_i = K + B_2 e_i^{m_1}. \quad (10)$$

В выражениях (9) и (10)  $B_1, B_2, m, m_1$  и  $K$  – константы материала.

Таким образом, средняя величина диссипации энергии в каждом интервале может быть определена по зависимости:

$$E_{\text{ср}} = \varepsilon_{i\text{ср}} \cdot \sigma_i. \quad (11)$$

Приращение работы деформирования за интервал получим, умножив диссипацию энергии на время деформирования:

$$\Delta A = E_{\text{ср}} \Delta t. \quad (12)$$

Суммарную работу, затрачиваемую на деформирование элементарного объема при изгибе полосы в валках профилегибочных станов до относительного внутреннего радиуса изгиба  $r_B$ , получим, просуммировав приращения работы в отдельных интервалах:

$$A_{\text{сум}} = \sum \Delta A. \quad (13)$$

$$\omega = \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}, \quad (14)$$

Пример определения величины удельной работы деформирования элементарного объема при изгибе полосы с углом  $\varphi_0 = \frac{\pi}{4}$  и относительным внутренним радиусом изгиба  $r_b = 1$  для стали Ст. 3сп приводится в табл. 1.

Как и при определении деформаций, зафиксированы промежуточные положения при  $r_b$ , равном 250, 100, 50 и т.д. с соответствующими углами изгиба. Поскольку скорости перемещения частиц при профилировании относительно малы, можно принять  $\omega = 1$ . Тогда, из соотношения

получим:

$$\Delta \varphi = \Delta t.$$

По уравнению (12) определено приращение работы между двумя смежными положениями. По уравнению (13) определена суммарная работа, затрачиваемая на деформирование элементарного объема при изгибе с конечным относительным внутренним радиусом  $r_b$  и углом изгиба  $\varphi_0$ .

Таблица 1 – Пример последовательности расчета удельной работы деформирования элементарного объема при изгибе полосы с углом  $\varphi_0 = \frac{\pi}{4}$  и относительным внутренним радиусом изгиба  $r_b = 1$  для стали Ст. 3сп

Определяемая величина	при $r_b$							
	250	100	50	25	10	5	2	1
$\epsilon_i, 1/\text{сек}$	0,536	0,536	0,523	0,505	0,458	0,472	0,5	0,49
$\epsilon_n$	0,002	0,005	0,0099	0,0194	0,0464	0,0826	0,1758	0,3308
$\sigma_i, \text{Мн}/\text{м}^2$	188	211	273	288	388	443	530	610
$E, \text{Мн}/\text{м}^2 \text{ сек}$	0,101	0,113	0,143	0,145	0,178	0,209	0,265	0,299
$\Delta t, \text{сек}$	$\frac{1}{233,2}$	$\frac{1}{233,2}$	$\frac{1}{93,6}$	$\frac{1}{46,8}$	$\frac{1}{23,4}$	0,088	0,224	0,366
$\Delta A, \text{Мдж}/\text{м}^3$	0,42	0,73	1,53	3,1	11,4	18,4	56	106
$A, \text{Мдж}/\text{м}^3$	0,42	1,15	2,68	5,78	17,2	35,6	91,6	197,6

Подобным образом рассчитана максимальная величина удельной работы деформирования элементарного объема при изгибе полосы с углом  $\varphi_0 = \frac{\pi}{4}$  и различными относительными внутренними радиусами изгиба.

Величины максимальной удельной работы деформирования в зависимости от относительного внутреннего радиуса изгиба для сталей Ст. 3сп и 09Г2 приведены в табл. 2

Таблица 2 – Максимальная удельная работа деформирования

Марка стали	Значение удельной работы деформирования $A, \text{Мдж}/\text{м}^3$ , при $r_b$				
	0,1	0,25	0,5	1	2
Ст. 3сп	688	462	286	198	109
09Г2	737	490	311	203	113

По данным табл. 2 построен график изменения удельной работы деформирования элементарного объема в зависимости от относительного внутреннего радиуса изгиба (рис. 1). На этом же графике в виде прямых линий нанесены величины удельной работы разрушения для сталей марок Ст.

3сп (1) и 09Г2 (2). Пересечение кривой зависимости удельной работы деформирования от относительного внутреннего радиуса изгиба с прямой критической работы разрушения дает критическое значение относительного внутреннего радиуса изгиба.

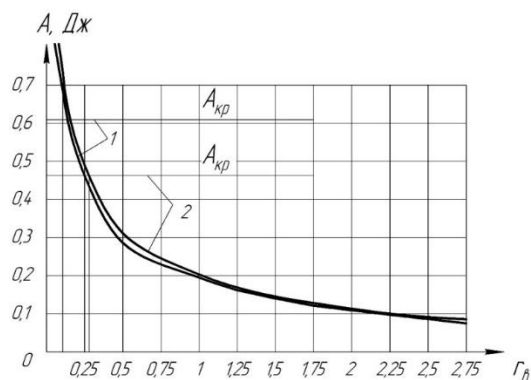


Рис. 1 – Графики удельной работы деформирования в зависимости от относительного внутреннего радиуса изгиба:  
1 – для стали Ст.3сп; 2 – для стали 09Г2

Из выражения (7) видно, что удельная работа деформирования зависит не только от радиуса, но также и от угла изгиба.

Зависимость удельной работы деформирования от относительного внутреннего радиуса изгиба для угла изгиба  $\varphi_0 = \frac{\pi}{4}$  приведена в табл. 2.

Такие же расчетные данные получены для различных значений угла  $\varphi_0$ , по полученным результатам построены соответствующие графики (см. рис. 2 и рис. 3)

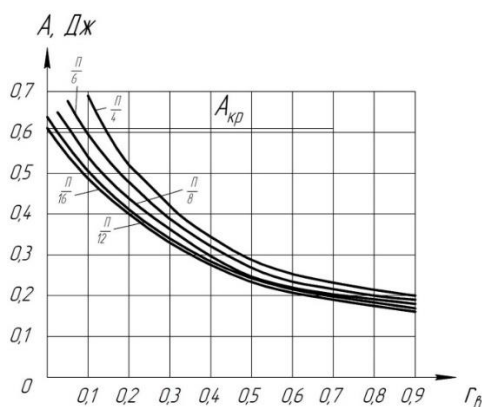


Рис. 2 – Графики изменения удельной работы деформирования для стали Ст. 3сп при различных значениях углов подгибки

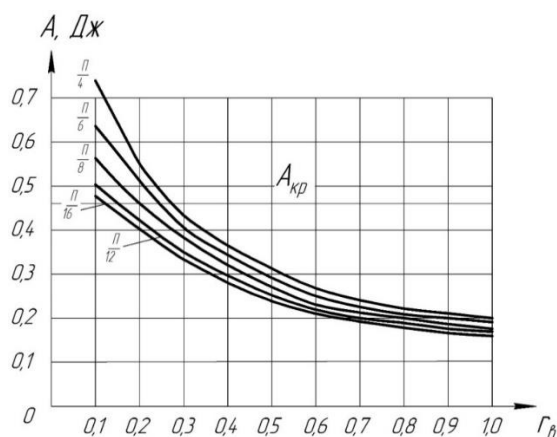


Рис. 3 – Графики изменения удельной работы деформирования для стали 09Г2 при различных значениях углов подгибки

Из графиков, приведенных на рис. 2 и рис. 3 видно, что с уменьшением углов подгибки удельная работа деформирования уменьшается. Пересечение кривых, соответствующих различным значениям угла  $\varphi_0$ , с прямыми критической удельной работы

разрушения дает значения критических радиусов для различных углов подгибки заготовки.

В соответствии с полученными данными, построен график изменения критического радиуса разрушения в зависимости от углов подгибки для различных марок стали. График для сталей марок

сталь Ст. 3сп и сталь 09Г2 приведен на рис. 4. Так как все расчеты приведены в относительных величинах, радиус в конкретных случаях изгиба необходимо определять следующим образом: по заданному углу изгиба на готовом профиле с помощью графика

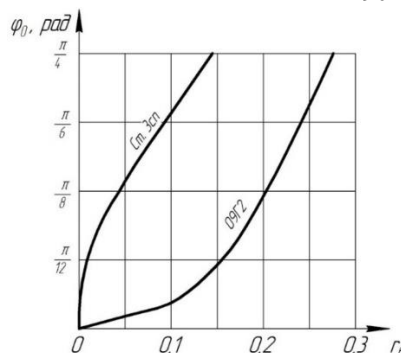


Рис. 4 – Графики критического радиуса разрушения  $r_k$  в зависимости от угла подгибки  $\varphi_0$

Технологические радиусы изгиба отличаются от расчетных значений коэффициентом запаса прочности. Следовательно, при непрерывном процессе профилирования минимальный допустимый радиус изгиба равен

$$r_{\min} = k \cdot r_k. \quad (15)$$

Из графика (рис. 1) видно, что при малых величинах радиусов незначительное уменьшение радиуса изгиба вызывает резкое повышение удельной работы деформирования. При коэффициенте запаса прочности, равном 2, удельная работа деформирования будет значительно меньше критической работы разрушения, в связи с чем будет гарантировано получение профилей без трещин.

При непрерывном процессе профилирования (принимая  $k=2$ ), при подгибке на  $90^\circ$  профилирования получим минимальные допустимые радиусы изгиба:

- для рядовых сталей  $r_{\min} = 2 \cdot 0,16 = 0,32$ ;
- для низколегированных сталей

$$r_{\min} = 2 \cdot 0,27 = 0,54.$$

При поштучном процессе профилирования в результате разрезки ленты перед профилигибочным станом концы полосы получают наклепанными. Кроме того, на них могут образовываться заусенцы, которые на переднем конце получают на наружной поверхности профиля. Все это ужесточает условия деформирования концов полосы.

Эксперименты показывают, что минимальный допустимый радиус изгиба для наклепанного металла должен быть в  $1,7 \div 2$  раза больше, чем для отожженного. Изгиб заусенцами наружу также требует увеличения минимального радиуса изгиба в  $1,65 \div 1,75$  раза.

Таким образом, для поштучного процесса профилирования необходимо принимать

$$r_{\min} = (2,8 \div 3,5)kr_k. \quad (16)$$

При изгибе с углом  $\varphi_0 = \frac{\pi}{4}$  радиусы необходимо принимать:

- для рядовых сталей  $r_{\min} = 0,9 \div 1,1$ ;
- для низколегированных сталей

$$r_{\min} = 1,5 \div 1,9.$$

(рис. 4) можно определить критические радиусы разрушения:

- для рядовых сталей (Ст. 3сп), при изгибе на  $90^\circ$   $r_k = 0,16$ ;
- для низколегированных сталей (09Г2) при изгибе на  $90^\circ$   $r_k = 0,27$ .

**Выводы.** Методом механики сплошных сред с использованием поля скоростей перемещений определена удельная работа деформирования элементарного объема места изгиба при профилировании. Удельная работа деформирования с уменьшением радиуса и увеличением угла изгиба возрастает. Из сравнения удельной работы деформирования при изгибе с критической работой разрушения получен критический радиус разрушения  $r_k$ , который при изгибе на угол  $\varphi_0 = \frac{\pi}{4}$  соответственно равен: для стали Ст. 3сп  $r_k=0,16$ , для стали 09Г2  $r_k=0,27$ . С увеличением угла изгиба величина критического радиуса также увеличивается. Технологические радиусы изгиба должны отличаться от расчетных значений критического радиуса изгиба коэффициентом запаса прочности, то есть  $r_{\min} = kr_k$ . При поштучном процессе профилирования, когда имеют место наклеп и заусенцы на концах полосы, относительный минимальный внутренний радиус изгиба следует определять по формуле  $r_{\min} = (2,8 \div 3,5)kr_k$ .

#### Список литературы

1. Фридман Я.Б. Деформация и разрушение металлов при статических и ударных нагрузках. / Я.Б. Фридман. – Москва: Оборонгиз, 1946. – 285 с.
2. Томлёнов А.Д. Теория пластического деформирования металлов / А.Д. Томлёнов – Москва: Металлургия, 1972. – 480 с.
3. Смирнов-Аляев Г.А. Критерии пластичности, степени деформируемости и начала разрушения металлов в инженерных расчетах процессов обработки давлением. Инженерные методы расчета технологических процессов обработки металлов давлением. / Г.А. Смирнов-Аляев. – Москва: Металлургиздат, 1963.
4. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию / / Г.А. Смирнов-Аляев. – Москва: Машгиз, 1981. – 464 с.
5. Datskol, Jang C.T. Determine Minimum Bend Radii from standard Tensile Test Results. / Jang C.T. Datskol // Materials in Design Engineering, 1960. Vol. 51, p. 128–129.
6. Гун Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением: учебное пособие для вузов / Г.Я. Гун. – Москва: Металлургия, 1983. – 285 с.
7. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. / А.А. Ильюшин. 3-е изд. – Москва: Изд-во МГУ, 1990. – 285 с.
8. Бровман И.Я. Применение теории пластичности в прокатке / И.Я. Бровман. – Москва: Металлургия, 1991. – 265 с.

9. Алексеев Ю.Н. Введение в теорию обработки металлов давлением, прокаткой и резанием / Ю.Н. Алексеев. – Харьков: Изд-во ХГУ, 1969. – 107 с.
10. Алексеев Ю. Н. Вопросы пластического течения металлов. / Ю.Н. Алексеев. – Харьков: Изд-во ХГУ, 1958. – 158 с.

**Bibliography (transliterated)**

1. Fridman Ya.B. Deformatsiya i razrushenie metallov pri staticheskikh i udarnykh nagruzkah [Deformation and fracture of metals under static and impact loads]. – Moscow: Oborongiz, 1946. – 285 p.
2. Toml'yonov A.D. Teoriya plasticheskogo deformirovaniya metallov [The theory of plastic deformation of metals] – Moscow: Metallurgiya, 1972. – 480 p.
3. Smirnov-Alyayev G.A. Kriterii plastichnosti, stepeni deformiruemosti i nachala razrusheniya metallov v inzhenernykh raschetakh protsessov obrabotki davleniem. Inzhenernyye metody rascheta tehnologicheskikh protsessov obrabotki metallov davleniem [Criteria of plasticity, the degree of deformability and early destruction of metals in engineering calculations forming processes. Engineering methods of calculation of technological processes of metal forming]. – Moscow: Metallurgizdat, 1963.
4. Smirnov-Alyayev G.A. Soprotivlenie materialov plasticheskomu deformirovaniyu [Resistance to plastic deformation of materials] Moscow: Mashgiz, 1981. – 464 p.
5. Datskol, Jang C.T. Determine Minimum Bend Radii from standard Tensile Test Results. / Jang C.T. Datskol // Materials in Design Engineering, 1960. Vol. 51, p. 128–129.
6. Gun G.Ya. Matematicheskoe modelirovanie protsessov obrabotki metallov davleniem: uchebnoe posobie dlya vuzov [Mathematical modeling of metal forming processes: textbook for high schools] – Moscow: Metallurgiya, 1983. – 285p.
7. Ilyushin A.A. Mehanika sploshnoy sredy. [Continuum Mechanics] 3-e izd. – Moscow: Izd-vo MGU, 1990. – 285 p.
8. Brovman I.Ya. Primenenie teorii plastichnosti v prokatke [Application of the theory of plasticity in the rolling] – Moscow: Metallurgiya, 1991. – 265 p.
9. Alekseev Yu.N. Vvedenie v teoriyu obrabotki metallov davleniem, prokatkoy i rezaniem [Introduction to the Theory of metal forming, rolling and cutting. Kharkov: Izd-vo KhGU, 1969. – 107 p.
10. Alekseev Yu. N. Voprosyi plasticheskogo techeniya metallov. [Questions plastic flow of metals] – Kharkov: Izd-vo KhGU, 1958. – 158 p.

Поступила (received) 15.11.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Исследование возможности получения минимальных радиусов мест изгиба при валковой формовке гнутых профилей / Ю. А. Плеснецов, Т. А. Джорубов, А. Г. Крюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 38(1210). – С. 56–62. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2519-2671**

**Дослідження можливості отримання мінімальних радіусів місць вигину при валковій формуванні гнутих профілів / Ю. О. Плеснецов, Т. А. Джорубов, А. Г. Крюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 38(1210). – С. 56–62. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2519-2671**

**Research the possibility of obtaining the minimum bend radius places during roll forming cold-formed sections / Yu.A. Plesnetsov, T.A. Dzhorubov, A.G. Kryuk // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 38 (1210). – P. 56–62. – Bibliogr.: 10 – ISSN 2519-2671**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Плеснецов Юрий Александрович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий кафедрой «Обработка металлов давлением» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002, тел.: (057) 707-60-40, e-mail: plesnetsov@gmail.com

**Плеснецов Юрій Олександрович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач кафедри «Обробка металів тиском» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», вул. Фрунзе, 21, м. Харків, Україна, 61002, тел.: (057) 707-60-40, e-mail: plesnetsov@gmail.com

**Plesnetsov Yuri**, Ph.D – Senior Research Fellow, Head of the Department «Metal Forming» of the National Technical University “Kharkiv polytechnic institute», tel.: (057) 707-60-40, e-mail: plesnetsov@gmail.com

**Джорубов Тохир Алишерович** – магистрант кафедры «Обработка металлов давлением» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002, тел.: (097) 243-19-90, e-mail: tohir13@gmail.com

**Джорубов Тохір Алішерович** магистрант кафедри «Обробка металів тиском» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», вул. Фрунзе, 21, м. Харків, Україна, 61002, тел.: (097) 243-19-90, e-mail: tohir13@gmail.com

**Dzhorubov Tokhir** – graduate student of the Department «Metal Forming» of the National Technical University “Kharkiv polytechnic institute», tel.: (097) 243-19-90, e-mail: tohir13@gmail.com

**Крюк Анатолій Григорьевич** – кандидат технических наук, профессор кафедры «Естественные науки и технологии» Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеця, г. Харьков; тел.: (057) 7020265 (доп. 328); e-mail: kaftech@hneu.edu.ua.

**Крюк Анатолій Григорович** – кандидат технічних наук, професор кафедри «Природничі науки та технології» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: (057) 7020265 (доп. 328); e-mail: kaftech@hneu.edu.ua.

**Kryuk Anatoliy Grigorievich** – PhD, professor of "Science and Technology" Kharkiv National Economic University named after Semen Kuznets on Kharkiv; tel. (057) 7020265 (dop. 328); e-mail: kaftech@hneu.edu.ua