

Тришевский О.И.,

Кейдун Д.П.

Харьковский национальный техниче-
ский университет сельского хозяйства
имени П.Василенко, г. Харьков, Укра-
ина

E-mail: 3shev@ukr.net

МИНИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ РАДИУСЫ ИЗГИБА ПРИ ПРОФИЛИРОВАНИИ

УДК 621.771.63

По результатам сравнения удельной работы деформации при профилировании с критической работой разрушения получены значения критического радиуса разрушения при угле подгибки 90°, которые могут быть использованы при проектировании рациональной технологии производства гнутых профилей для малоуглеродистой и низколегированной стали. С учётом коэффициентов запаса установлены значения минимально допустимых радиусов изгиба этих сталей при непрерывном и поштучном процессах профилирования.

Ключевые слова: гнутые профили, критерии разрушения, напряжённно-деформированное состояние, растяжение, изгиб, функция диссипации энергии, удельная работа деформирования, минимально допустимый радиус изгиба, непрерывный процесс профилирования, поштучный процесс профилирования.

Вступление, актуальность и постановка проблемы.

Одним из основных конструкционных материалов, широко используемых при изготовлении каркасных, рамных и других элементов сельскохозяйственной техники являются гнутые профили проката различных типов. На надёжность эксплуатации этой техники существенное влияние оказывает возможное наличие в используемых при изготовлении деталей скрытых дефектов, связанных с особенностями их производства, которые через определённое время могут привести к развитию трещин и надрывов в узлах машин и механизмов и в конечном счёте к разрушению конструкций.

Деформированное состояние металла в местах изгиба, характеризуется большими пластическими деформациями в поперечном направлении (вплоть до появления трещин на поверхности), определяет важнейший параметр процесса профилирования – минимальный радиус сопряжения прямолинейных элементов гнутых профилей.

На напряжённно-деформированное состояние металла в местах изгиба, а следовательно, и на минимальный радиус изгиба существенно влияют утонение и упрочнение металла. Совместное действие этих факторов при больших степенях деформации и недостаточной пластичности материала может привести к появлению трещин и разрушению профилей. Для учёта этого действия необходимо использовать критерий, который являлся бы универсальной характеристикой материала. В качестве такого критерия прием работу деформирования единичного объёма до разрушения при растяжении.

Основные результаты исследований

Как установлено в [1], интенсивность скоростей деформаций ε_i определяется и достигает максимальных значений на биссектрисе центрального угла места изгиба, то есть при $\varphi = 0$. При этом, ε_i запишется следующим образом:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\frac{2v_0}{S_0(r_n + r_g)} \left(1 - \frac{r_n r_g}{\bar{r}^2} \right) + \frac{\sqrt{r_n}}{\sqrt{r_g}} \eta \left(1 + \frac{r_g^2}{\bar{r}^2} \right) \right], \quad (1)$$

где v_0 – радиальная скорость точек, лежащих на поверхности места изгиба;

S_0 – начальная толщина полосы, мм;

r_n и r_e – относительный наружный и внутренний радиусы изгиба соответственно;

r – радиус-вектор рассматриваемой точки;

$\bar{r} = \sqrt{r_n r_e}$ – радиус-вектор по нейтральному слою напряжений;

$\eta = \frac{\Delta S_{\max}}{S_0}$ – коэффициент утонения (максимальная величина относительного утонения).

В работе [2] доказано, что разрушение внутренней поверхности изгибаемого участка может произойти только в случае $\frac{e_{ie}}{e_{in}} > 8$, то есть при $r_e < 0,05$. Следовательно,

при $r_e > 0,05$ разрушение произойдет на наружной поверхности места изгиба. Подставляя (1) и равенство $\bar{r} = r_n$ в известное выражение для функции диссипации энергии: $E = \sigma_i \varepsilon_i$, получим выражение для функции диссипации энергии в наиболее опасной точке места изгиба:

$$E = \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} \left[\frac{2\nu_0}{S_0 (r_n + r_e)} \left(1 - \frac{r_e}{r_n} \right) + \frac{\sqrt{r_n}}{\sqrt{r_e}} \eta \left(1 + \frac{r_e^2}{r_n^2} \right) \right]. \quad (2)$$

Удельную работу деформирования элементарного объема наружной поверхности места изгиба можно получить, проинтегрировав выражение (2):

$$A_{y\partial} = \int_0^t \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} \left[\frac{2\nu_0}{S_0 (r_n + r_e)} \left(1 - \frac{r_e}{r_n} \right) + \frac{\sqrt{r_n}}{\sqrt{r_e}} \eta \left(1 + \frac{r_e^2}{r_n^2} \right) \right] dt. \quad (3)$$

В этом выражении интенсивность напряжений σ_i , относительные радиусы r_e и r_n и относительное утонение η зависят от времени t . Так как установить эту связь в простом виде и проинтегрировать выражение (3) в общем виде не представляется возможным, для определения величины удельной работы был применен метод приближенного вычисления.

При определении величин деформаций на наружной и внутренней поверхностях места изгиба весь процесс изгиба до относительного внутреннего радиуса r_e разбиваем на n интервалов, вычисляем среднее значение интенсивности скоростей деформаций ε_{icp} , действующей в данном интервале, и приращение деформаций за интервал.

Пользуясь известными выражениями, описывающими зависимость напряжений от деформаций в упрочняющемся материале: $\sigma_i = B_1 e_i^m$, и $\sigma_i = k + B_2 e_i^m$, где B_1 , B_2 , m и k – коэффициенты, зависящие от свойств металла, определяем соответствующие этим деформациям значения интенсивности напряжений σ_i . Тогда средняя величина функции диссипации энергии в интервале будет:

$$E_{cp} = \varepsilon_{icp} \sigma_i.$$

Приращение работы деформирования за интервал получим, умножив энергию диссипации на время деформирования:

$$A = E_{cp} \Delta t$$

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

$$A_{\text{сум}} = \Sigma \Delta A$$

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

Таблица 1

Пример последовательности расчета удельной работы деформирования элементарного объема при изгибе полосы с углом $\varphi_0 = \pi/4$ и относительным внутренним радиусом изгиба $r_e = 1$ для стали Ст.3сп

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

Подобным же образом была вычислена максимальная величина удельной работы деформирования элементарного объема при изгибе полосы с углом $\varphi_0 = \pi/4$ и различными относительными внутренними радиусами изгиба (табл 2).

Таблица 2

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

Материал	Значение удельной работы деформирования A , Мдж/м ³ при r_e				
	0,1	0,25	0,5	1	2
Ст.3сп	688	462	286	198	109
09Г2	737	490	311	203	113

На основе полученных данных построен график изменения удельной работы деформирования элементарного объема в зависимости от относительного внутреннего радиуса изгиба (рис. 1).

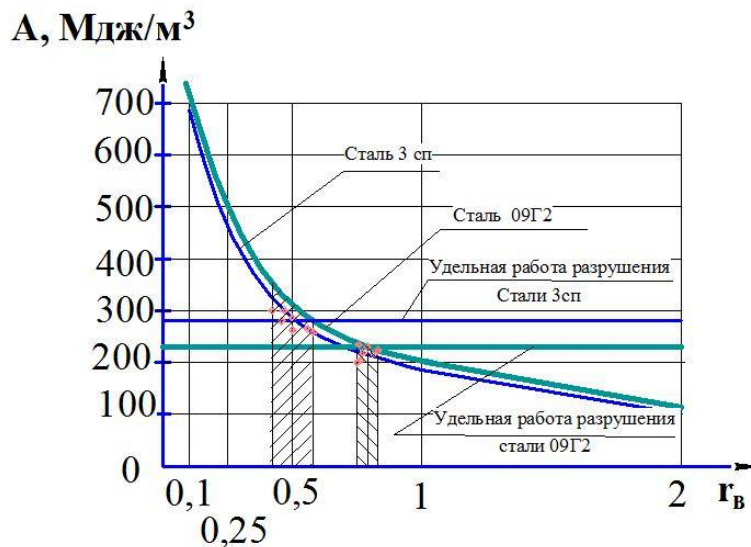


Рис.1 График изменения удельной работы деформирования элементарного объема от относительного радиуса изгиба

На этом же графике в виде прямых линий нанесены величины удельной работы разрушения для сталей марок Ст 3 СП и 09Г2. Пересечение кривой зависимости удельной работы деформирования от относительного внутреннего радиуса изгиба с прямой работы разрушения [3] определяет критическое значение относительного внутреннего радиуса изгиба. На этом же рисунке в виде заштрихованных участков показаны зоны разброса экспериментально полученных величин критических радиусов разрушения. Совпадение теоретических и экспериментальных данных удовлетворительное.

Зависимость удельной работы деформирования от относительного внутреннего радиуса изгиба для угла изгиба $\varphi_0 = \pi/4$ приведена в табл.1. Такие же данные получены для различных значений угла φ_0 .

Из анализа полученных данных следует, что с уменьшением угла изгиба удельная работа деформирования уменьшается. Пересечение кривых, соответствующих различным значениям угла φ_0 , с прямыми критической удельной работы разрушения дает значения критических радиусов для различных углов изгиба заготовки.

Для рядовых сталей, представителем которых является сталь марки Ст.3сп, при изгибе на 90° критический радиус разрушения составляет $r_k = 0,14$, для низколегированных сталей (09Г2) при тех же условиях $r_k = 0,27$.

В результате деформирования в первых клетях профилегибочных станов заготовки получают наклепанными. Эксперименты показывают [4], что минимальный допустимый радиус изгиба для наклепанного металла должен быть в $1,7 \div 2$ раза больше, чем для отожженного.

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

$$r_{min} = (1,7 \div 2) k r_k \quad (4)$$

Из графика зависимости работы деформирования от относительного внутреннего радиуса изгиба (рис.1) видно, что при малых величинах радиусов незначительному их уменьшению соответствует резкое повышение удельной работы деформирования. Установлено [5], что при изгибе первые макротрещины величиной порядка $0,2-0,3$ мм появляются задолго до достижения нагрузкой максимального значения. Отношение прогиба (угла), при котором образуются первые трещины, к прогибу (углу), соответствующему максимальному значению силы, составляет в среднем приблизительно $0,5$. При коэффициенте запаса прочности, равном 2 , удельная работа деформирования значительно меньше критической работы разрушения.

Принимая $k = 2$, при изгибе на 90° для непрерывного процесса профилирования соответственно получим минимальные допустимые радиусы изгиба:

$$\text{для рядовых сталей} \quad r_{min} = (3,4-4) \times 0,14 = 0,48 \div 0,56;$$

$$\text{для низколегированных сталей} \quad r_{min} = (3,4-4) \times 0,27 = 0,92 \div 1,08.$$

При поштучном процессе профилирования в результате разрезки заготовки перед станом на концах полос могут образовываться заусенцы, которые на переднем конце получают на наружной поверхности профиля. Это ужесточает условия деформирования концов полосы. Изгиб с заусенцами наружу требует увеличения минимального радиуса изгиба в $1,65 \div 1,75$ раза [4].

Таким образом, для поштучного процесса профилирования

$$r_{min} = (2,8 \div 3,5) k r_k \quad (5)$$

При изгибе с углом $\varphi_0 = \frac{\pi}{4}$ радиусы соответственно будут:

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

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

Минимальные допустимые радиусы изгиба следует применять лишь в случае конструктивной необходимости; во всех остальных случаях рекомендуется их увеличивать.

Полученные результаты основаны на анализе выражения для интенсивности скоростей деформаций при цилиндрическом изгибе с утонением. Проведенные исследования [1] показали, что для скоростей деформаций при изгибе по конической поверхности с утонением по сравнению с цилиндрическим изгибом с утонением в опасных точках дополнительно появляются только сдвиговые скорости деформаций \mathcal{E}_{rr} . Но так как их величины при профилировании не превышают 3% от максимальных величин (\mathcal{E}_{rr}), то они не оказывают существенного влияния на величину интенсивности скоростей деформаций. Следовательно, для определения критических радиусов разрушения при профилировании можно пользоваться значениями, полученными для изгиба по цилиндрической поверхности с утонением.

Выводы

Таким образом, по результатам сравнения удельной работы деформации при профилировании с критической работой разрушения получены следующие значения критического радиуса разрушения при угле подгибки 90° , которые могут быть использованы при проектировании рациональной технологии производства гнутых профилей: для малоуглеродистой стали $r_k = 0,14$; для низколегированной стали $r_k = 0,27$.

С учётом коэффициентов запаса установлены следующие значения минимально допустимых радиусов изгиба: а) при непрерывном профилировании: малоуглеродистой стали $r_{min} = 0,48 \div 0,56$; низколегированных сталей $r_{min} = 0,92 \div 1,08$. б) при поштучном профилировании: малоуглеродистой стали $r_{min} = 0,9 \div 1,1$; низколегированных сталей $r_{min} = 1,5 \div 1,9$.

Литература

7. Тришевский И.С., Докторов М.Е. Теоретические основы процесса профилирования. [Текст] / Москва: Металлургия, 1980. – 287 с.
8. Планк М. Введение в теоретическую физику. Ч.2. Механику деформируемых тел. Текст] / Москва: Оборонгиз, 1932. – 184 с.
9. Пашинская Е.Г., Ткаченко В.М., Завдоев А.В. Диссипация энергии при растяжении стали Ст 3, полученной интенсивной пластической деформацией путём прокатки со сдвигом. [Текст] / Физика и техника высоких давлений. Том 26, №1,2, 2015. – с.20-26.
10. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Изд. 6. [Текст] / Ленинград: Машиностроение, 1979. – 520 с.
11. Разов И.А., Шевандин Е.М. Кинетика пластического деформирования и разрушения стали при изгибе. [Текст] / Физика металлов и металловедение. Том IX, вып.1. Свердловск: Metallurgizdat, 1960. – с.68-74.

Summary

Trishevsky O.I. Minimum possible radiuses of bend at profiling

On results comparison of specific work of deformation at profiling with critical work of destruction the values of critical radius of destruction are got at bending of 90° , that can be used for planning of rational technology of production of the bent profiles for low-carbon and low-alloy steel. Taking into account the coefficients of supply values minimum of possible radiuses of bend of these materials are set at continuous and piece profiling processes.

Keywords: *the bent profiles, criteria of destruction, tensely-deformed state, tension, bend, function of dissipation of energy, specific work of deformation, minimum possible radius of bend, continuous process of profiling, piece process of profiling.*

References

1. Trishevskiy I.S., Doktorov M.E. Teoreticheskie osnovyi protsessa profilirovaniya. [Tekst] / Moskva: Metallurgiya, 1980. – 287 s.
2. Plank M. Vvedenie v teoreticheskuyu fiziku. Ch.2. Mehaniku deformiruemiyh tel. Tekst] / Moskva: Oborongiz, 1932. – 184 s.
3. Pashinskaya E.G., Tkachenko V.M., Zavdoveev A.V. Dissipatsiya energii pri rastyazhenii stali St 3, poluchennoy intensivnoy plasticheskoy deformatsiey put'om prokatki so sdvigom. [Tekst] / Fizika i tehnika vyisokih davleniy. Tom 26, #1,2, 2015. – s.20-26.
4. Romanovskiy V.P. Spravochnik po holodnoy shtampovke. Izd. 6. [Tekst] / Leningrad: Mashinostroenie, 1979. – 520 s.
5. Razov I.A., Shevandin E.M. Kinetika plasticheskogo deformirovaniya i razrusheniya stali pri izgibe. [Tekst] / Fizika metallov i metallovedenie. Tom IX, vyip.1. Sverdlovsk: Metallurgizdat, 1960. – s.68-74.