

Тришевский О.И.

Митрофанов С.А.

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени П.Василенко,
г. Харьков, Украина
E-mail: 3shev@ukr.net

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНО
ДОПУСТИМЫХ РАДИУСОВ ИЗГИБА
ПРИ ПРОФИЛИРОВАНИИ

УДК 621.771.63

В работе на основании результатов теоретического анализа напряжённно-деформированного состояния металла в местах изгиба гнутых профилей проката исходя из равенства истинного напряжения разрушения при растяжении и изгибе определены значения критических радиусов разрушения в зависимости от характеристик исходных механических свойств металла полосы для малоуглеродистой и низколегированной сталей.

Ключевые слова: гнутые профили, профилирование, минимальные радиусы изгиба, относительное удлинение, относительное сужение, предел текучести, интенсивность напряжений, малоуглеродистые стали, низколегированные стали.

Вступление, актуальность и постановка проблемы. Радиусы закруглений между плоскими элементами гнутых профилей являются важнейшей технологической и эксплуатационной характеристикой этого эффективного вида металлопродукции. Минимально допустимые радиусы изгиба с одной стороны лимитируются механическими свойствами исходной заготовки и интенсивностью принятого режима профилирования, с другой стороны определяют качество готовой продукции – возможность получения профилей без трещин и надрывов с оптимальной прочностью, жёсткостью и несущей способностью, определяемыми конфигурацией сечения профиля.

Вопрос о минимально допустимых радиусах, то есть о разрушении материала при деформации изгиба вначале решался на основании показателей относительного удлинения материала при испытаниях на растяжение δ_{10} . Однако в дальнейшем было доказано [1], что более правильно считать показателем пластичности материала относительное поперечное сужение ψ . Оценка пластичности по величине относительного поперечного сужения ψ была положена в основу методов определения минимально допустимых радиусов изгиба [2, 3, 4]. В этих работах с целью установления соответствия между растяжением и изгибом введены коэффициенты, точное определение которых зачастую невозможно.

При разработке технологии производства гнутых профилей и исследовательских работах по профилированию часто требуется тщательная оценка прочности и недостаточно знать отдельные характеристики механических свойств: пределы упругости, текучести, прочности, относительное удлинение, относительное сужение площади поперечного сечения. Необходимо учитывать их совместное влияние на параметры напряжённно-деформированного состояния металла, определяющие начало разрушения.

Следует учитывать, что при пластическом деформировании разрушение металла не может происходить внезапно, в результате достижения критической величины предельной прочности. В деформируемом теле происходит накопление и развитие таких явлений и процессов, которые постепенно исчерпывают предельную прочность и делают неизбежным разрушение в тот момент, когда состояние металла будет должным образом подготовлено. Сам акт разделения образца на части лишь завершает эти процессы.

Большинство процессов, вызывающих разрушение достаточно пластичной малоуглеродистой стали, является следствием формоизменения, поэтому разрушение её необходимо связать с процессами пластической деформации. Если при определении соотношения между напряжениями в точке деформируемого объёма напряжённное состояние достигает

пределной степени, начинается пластическая деформация. Это – первое предельное состояние. Второе предельное состояние определит начало разрушения материала.

А.А. Ильющин [5] показал, что в случае простого нагружения зависимость $\bar{\sigma} - \epsilon$, полученная для растяжения разрывных образцов на основании статистически усреднённых основных характеристик механических свойств материала, может быть распространена на другие схемы нагружения, в частности на изгиб.

При растяжении разрывных образцов разрушение наступает, когда $\bar{\sigma}_i = \bar{\sigma}_{ск}$.

На основании известных соотношений:

$$\sigma_{ск} = \frac{\sigma_{\epsilon}}{1 - \psi}. \quad (1)$$

Следовательно, разрушение места изгиба при профилировании наступит, когда будет выполнено условие:

$$\sigma_{i/изгиба} = \frac{\sigma_{\epsilon}}{1 - \psi}. \quad (2)$$

Основные результаты исследований. При профилировании наибольшую степень деформации испытывают поверхностные слои места изгиба. При этом, трещина впервые образуется в местах пересечения биссектрисы центрального угла с наружной поверхностью места изгиба и при дальнейшем деформировании распространяется по толщине заготовки.

Тангенциальные нормальные напряжения в поверхностном слое наружной зоны при $r=R_n$ согласно [6] выразится уравнением:

$$\sigma_{\varphi\varphi}^H = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\sigma_0 + \frac{\Pi}{2} \ln \frac{R_n}{R_{\epsilon}} \right]. \quad (3)$$

Радиальные напряжения σ_{rr}^H на наружной поверхности равны нулю, а аксиальные – определяются выражением:

$$\sigma_{zz}^H = 0,5\sigma_{\varphi}^H.$$

Тогда интенсивность напряжений на наружной поверхности места изгиба:

$$\sigma_i^H = \sigma_0 + \frac{\Pi}{2} \ln \frac{R_n}{R_{\epsilon}}, \quad (4)$$

где σ_i^H – интенсивность напряжений на наружной поверхности;

σ_0 – условный предел текучести, равный

$$\sigma_0 = \sigma_m (1 - e_p), \quad (5)$$

Π – модуль упрочнения второго участка диаграммы истинных напряжений;

R_n и R_{ϵ} – наружный и внутренний радиусы изгиба в рассматриваемом сечении;

e_p – предельная равномерная деформация при растяжении.

Подставляя (4) и (5) в (2), получим:

$$\sigma_m (1 - e_p) + \frac{\Pi}{2} \ln \frac{R_n}{R_{\epsilon}} = \frac{\sigma_{\epsilon}}{1 - \psi}. \quad (6)$$

При линейном законе упрочнения модуль упрочнения Π на втором участке диаграммы истинных напряжений равен $\Pi = \sigma_m$ [7]. Учитывая это и решая уравнение (6) относительно радиуса, получим:

$$\frac{R_n}{R_{\epsilon}} = \exp \left\{ 2 \left[\frac{\sigma_{\epsilon}}{\sigma_m (1 - \psi)} - 1 + e_p \right] \right\}. \quad (7)$$

Наружный и внутренний радиусы места изгиба связаны между собой соотношением:

$$R_n = R_e + S_0, \quad (8)$$

где S_0 – толщина исходной заготовки.

Подставляя (8) в (7) и разделив числитель и знаменатель левой части на толщину исходной заготовки S_0 , получим:

$$1 + \frac{1}{r_e} = \exp \left\{ 2 \left[\frac{\sigma_e}{\sigma_m (1 - \psi)} - 1 + e_p \right] \right\}. \quad (9)$$

Отсюда относительный внутренний критический радиус разрушения при профилировании будет равен:

$$r_k = \frac{1}{\exp \left\{ 2 \left[\frac{\sigma_e}{\sigma_m (1 - \psi)} - 1 + e_p \right] \right\} - 1}. \quad (10)$$

Для углеродистых марок стали согласно [7]:

$$\sigma_m = (1,95 \div 2,15) \sigma_s.$$

Принимая значение $\sigma_m = 2\sigma_s$ и подставляя его в (10), получим:

$$r_k = \frac{1}{\exp \left[\frac{\sigma_e}{\sigma_s (1 - \psi)} - 2(1 - e_p) \right] - 1}. \quad (11)$$

Таким образом, получено выражение для определения относительного критического радиуса изгиба при профилировании без учёта утонения полосы.

В реальных процессах производства холодногнутого профиля проката в местах изгиба полосы развивается утонение. В работе [8] показано отличие величин деформаций при профилировании с учётом и без учёта утонения. Как видно из рис.1, увеличение деформаций на наружной поверхности криволинейного элемента профиля от утонения в диапазоне относительных радиусов, при которых возможно разрушение, $r_B = 0,1 \div 1,5$ находится в пределах 5 ÷ 14%.

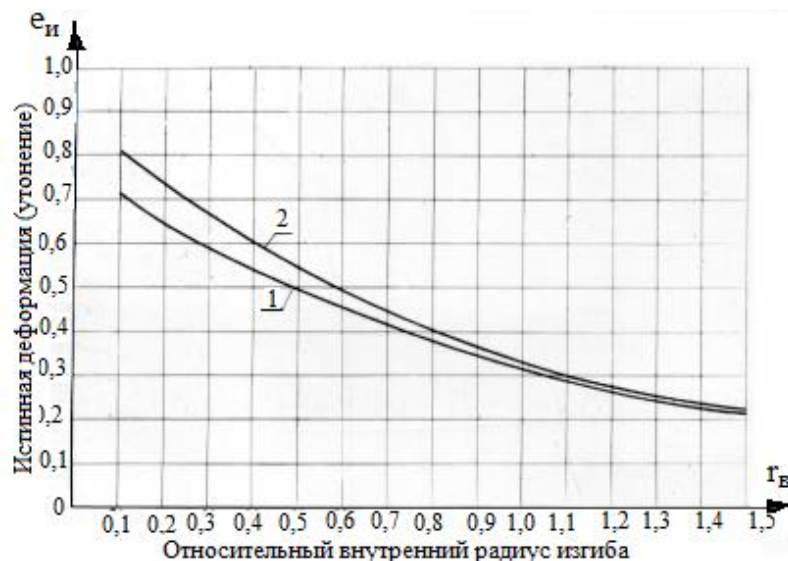


Рис.1 – Изменение величины деформаций на наружной поверхности места изгиба при профилировании в зависимости от относительного внутреннего радиуса r_B без учёта утонения (1) и с учётом утонения (2)

Обозначим коэффициент, учитывающий повышение величины деформации наружных волокон места изгиба от утонения, через k_r . Тогда выражение для тангенциальной нормальной деформации наружной поверхности изогнутого элемента профиля будет иметь вид:

$$e_{\varphi\varphi}^n = \frac{k_r}{2} \ln \frac{R_n}{R_e}. \quad (12)$$

При определении критических радиусов разрушения принимаем максимальное значение этого коэффициента $k_r = 1,14$.

С учётом влияния утонения выражения (4), (10) и (11) примут соответственно, вид:

$$\sigma_i^n = \sigma_0 + 0,577 \ln \frac{R_n}{R_e}, \quad (13)$$

$$\frac{R_n}{R_e} = \exp \left\{ 2 \left[\frac{\sigma_e}{1,14 \sigma_m (1-\psi)} - \frac{(1-e_p)}{1,14} \right] \right\}, \quad (14)$$

$$r_k = \frac{1}{\exp \left[\frac{\sigma_e}{1,14 \sigma_s (1-\psi)} - 1,76(1-e_p) \right] - 1}. \quad (15)$$

В соответствии с формулой (15) для малоуглеродистых сталей, представителем которых является сталь марки Ст.3сп, критический радиус разрушения $r_k = 0,142$, для низколегированных сталей (09Г2) $r_k = 0,251$.

В результате пластического деформирования в предыдущих клетях профилегибочного стана металл заготовки получает наклёп. На основании экспериментальных исследований установлено [3], что минимально допустимый радиус изгиба для наклёпанного металла должен быть в $1,7 \div 2$ раза больше, чем отожжённого.

Технологические радиусы изгиба отличаются от расчётных значений коэффициентом запаса прочности k . Следовательно, при непрерывном процессе профилирования минимально допустимый радиус изгиба должен быть равен:

$$r_{min} = (1,7 \div 2) k r_k \quad (16)$$

Установлено [9], что при изгибе первые микротрещины 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 $0,5$. Следовательно, коэффициент запаса прочности k должен быть равным 2 .

Принимая $k=2$, при непрерывном процессе профилирования соответственно получим минимально допустимые радиусы изгиба:

для малоуглеродистых сталей $r_{min} = (3,4 \div 4) \cdot 0,142 = 0,48 \div 0,57$;

для низколегированных сталей $r_{min} = (3,4 \div 4) \cdot 0,251 = 0,85 \div 1,0$.

При поштучном процессе профилирования в результате разрезки заготовки перед станом на концах полос могут образовываться заусенцы, которые на переднем конце получаются 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 [3].

Таким образом, для поштучного процесса профилирования:

$$r_{min} = (2,8 \div 3,5) k r_k \quad (17)$$

Для поштучного процесса профилирования минимально допустимые радиусы изгиба соответственно будут:

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

для низколегированных сталей $r_{min} = 1,4 \div 1,8$.

Минимально допустимые радиусы изгиба следует применять при конструктивной необходимости; во всех остальных случаях рекомендуется радиусы закругления несколько увеличивать.

Выводы. На основании результатов теоретического анализа напряжённо-деформированного состояния металла в местах изгиба гнутых профилей проката исходя из равенства истинного напряжения разрушения при растяжении и изгибе определены значения критических радиусов разрушения в зависимости от характеристик исходных механических свойств металла полосы для малоуглеродистой и низколегированной сталей.

Полученные данные следует использовать при расчёте калибровок вновь осваиваемых профилей и проектировании рациональной технологии их производства.

Литература

1. Бабичков В.А. О теоретических и экспериментальных предпосылках механической теории прочности. / Труды МИИТ, вып. 76, 1982. С.48-54.
2. Смирнов-Аляев Г.А. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением, Л.: Машиностроение, 1972.
3. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1979. 520 с.
4. Плеснецов Ю. А. Исследование возможности получения минимальных радиусов мест изгиба при валковой формовке гнутых профилей / Ю. А. Плеснецов, Т. А. Джорубов, А. Г. Крюк // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Сер. : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії = Bulletin of National Technical University "KhPI" : coll. works. Ser.: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Харків: НТУ "ХПІ", 2016. – No 38 (1210). – С. 56-62.
5. Ильющин А.А. Пластичность. Часть 1. Упруго-пластические деформации. М.: Логос, 2004. 376 с.
6. Тришевский О.И., Докторов М.Е. Теоретические основы процесса профилирования. М.:Металлургия, 1980.287 с.
7. Мошнин Е.Н. Элементы теории и новые процессы обработки металлов давлением. Труды ЦНИИТМАШ, вып.62 М.:Машгиз, 1954.
8. Алексеев Ю.Н. К вопросу определения деформаций при пластическом изгибе широкой полосы /Алексеев Ю.Н., Тришевский И.С., Пацка И.Е. //Сб. трудов УкрНИИМета «Теория и технология производства гнутых профилей проката».- Харьков: УкрНИИМет, 1967.– С. 87-94.
9. Разин.И.А., Шевандин Е.М. Кинетика пластического деформирования и разрушение стали при изгибе. Физика металлов и металловедение, т.IX, вып.1 Свердловск: Metallurgizdat, 1960.

Summary

Trishevsky O.I. Determination minimum of possible radiuses of bend at profiling

In-process on the basis of results of theoretical analysis of the tensely-deformed state of metal in the places of bend of the bent profiles of rent coming from equality of veritable

tension of destruction at tension and bend the values of critical radiuses of destruction depending on descriptions of initial mechanical properties of metal of stripe are certain for carbon and low-carbon steel.

Keywords: *the bent profiles, profiling, minimum radiuses of bend, relative lengthening, relative narrowing, limit of fluidity, intensity of tensions, low-carbon became, the low-alloy became.*

References

1. Babichkov V.A. O teoreticheskikh i eksperimentalnykh predposylkakh mekhanicheskoy teorii prochnosti. / Trudy MIIT, vyip. 76, 1982. S.48-54.
2. Smirnov-Alyayev G.A. Eksperimentalnyye issledovaniya v obrabotke metallov davleniem, L.: Mashinostroenie, 1972.
3. Romanovskiy V.P. Spravochnik po holodnoy shtampovke. L.: Mashinostroenie, 1979. 520 s.
4. Plesnetsov Yu. A. Issledovanie vozmozhnosti polucheniya minimalnykh radiusov mest iz-giba pri valkovoy formovke gnutykh profiley / Yu. A. Plesnetsov, T. A. Dzhorubov, A. G. Kryuk // VIsnik Nats. tehn. un-tu "HPI" : zb. nauk. pr. Ser. : InnovatsIynI tehnologIYi ta obladnannya obrobki materIalIv u mashinobuduvannI ta metalurgIYi = Bulletin of National Technical University "KhPI" : coll. works. Ser.: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – HarkIv: NTU "HPI", 2016. – No 38 (1210). – S. 56-62.
5. Piyushin A.A. Plastichnost. Chast 1. Uprugo-plasticheskie deformatsii. M.: Logos, 2004. 376 s.
6. Trishevskiy O.I., Doktorov M.E. Teoreticheskie osnovyi protsessa profilirovaniya. M.:Metallurgiya, 1980.287 s.
7. Moshnin E.N. Elementyi teorii i novyye protsessyi obrabotki metallov davleniem. Trudy TsNIITMASH, vyip.62 M.:Mashgiz, 1954.
8. Alekseev Yu.N. K voprosu opredeleniya deformatsiy pri plasticheskom izgibe shirokoy polosyi /Alekseev Yu.N., Trishevskiy I.S., Patseka I.E. //Sb. trudov UkrNIIMeta «Teoriya i teh-nologiya proizvodstva gnutykh profiley prokata».- Harkov: UkrNIIMet, 1967.– S. 87-94.
9. Razin.I.A., Shevandin E.M. Kinetika plasticheskogo deformirovaniya i razrushenie stali pri izgibe. Fizika metallov i metallovedenie, t.IX, vyip.1 Sverdlovsk: Metallurgizdat, 1960.