

3. Plesnecov Yu. A. Analiz sovremennogo sostoyaniya proizvodstva i primeneniya profiljnihkh trub Yu. A. Plesnecov, A. S. Zabara Zbirnik naukovikh pracj [Poltavsjkogo nacionaljnogo tehničnogo universitetu im. Yu. Kondratyuka]. Ser. Galuzeve mashinobuduvannya, budivnictvo. – 2013. – Vip. 2.
4. Trishevskij I.S. Teoreticheskie osnovih processa profilirovaniya I.S. Trishevskij, M.E. Doktorov. Moscow: Metallurgiya, 1980. 287 p.

Поступила (received) 29.10.2014

УДК 621.981:669.14

В. Г. ЗАГОРЯНСКИЙ, канд. техн. наук, доц.,
КрНУ им. М. Остроградского, Кременчуг

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАГРЕВА НА УПРУГОЕ ПРУЖИНЕНИЕ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ИЗГИБЕ ДВУХСЛОЙНЫХ ЛИСТОВ

Статья посвящена теоретическому анализу и экспериментальному исследованию влияния нагрева при гибке двухслойных листов на их упругое пружинение. Получены расчетные зависимости для определения пружинения при нагреве двухслойных листов (полос) при гибке. Для двухслойных листов коррозионностойкого биметалла 09Г2С + 12Х18Н10Т установлены зависимости угла пружинения от температуры нагрева двухслойных листов под гибку лакирующим слоем наружу и внутрь и определены оптимальные температуры нагрева.

Ключевые слова: пластический изгиб, двухслойный лист, изгибающий момент, упругое пружинение, влияние нагрева.

Введение. Процессы обработки давлением двухслойных сталей и других биметаллов, в связи с их физико-механическими особенностями, имеют существенные отличия от соответствующих процессов обработки монометаллов.

Основным методом изготовления деталей в нефтяном и химическом аппаратостроении является гибка листового проката.

Гибка цилиндрических и конических обечаек и секторов на универсальных листогибочных машинах выполняется в горячем и холодном состоянии. Гибка толстых листов выполняется в горячем состоянии. Технология гибки на таких машинах особенно распространена в химическом и нефтяном машиностроении, в котло– и судостроении, то есть в тех отраслях, где широко применяются двухслойные коррозионностойкие листы, в том числе и толстые, и другие биметаллы.

Анализ последних исследований и литературы. Известно [1], что расчет пружинения материала, анализ точности формообразования являются одними из главных задач при исследовании процессов пластического изгиба.

Анализ литературных источников по данной проблеме показал, что вопросы теоретического анализа упругого пружинения при гибке листов из

двухслойных сталей и других биметаллов, и получения соответствующих расчетных зависимостей для определения технологических параметров при гибке освещены недостаточно как в отечественных публикациях [2], так и в зарубежных изданиях, посвященных как технологиям плакирования [3], так и технологиям обработки металлов давлением, в том числе гибке [4, 5].

Следует отметить, что вопросу влияния нагрева под гибку на величину пружинения двухслойных коррозионностойких листов и других биметаллов в основополагающих в аспекте обработки давлением двухслойных сталей и других биметаллов работах Шевелкина Б.Н. с сотрудниками [6], а также в последующих работах других исследователей не уделялось достаточного внимания.

Цель исследования, постановка проблемы. Ставились задачи разработки расчетных зависимостей для определения упругого пружинения двухслойных листов при гибке с учетом нагрева, а также экспериментального исследования влияния нагрева под гибку на угол пружинения двухслойных листов.

Материалы исследований. Пластический изгиб двухслойного листа или широкой полосы (по аналогии со случаями изгиба монометаллического листа или полосы, а также биметаллического бруса [2]) будет сопровождаться упругими деформациями, в результате чего будет иметь место упругое пружинение.

Упругое пружинение, возникающее после снятия деформирующей нагрузки, характеризуется величиной угла $\Delta\alpha$, °, который зависит от соотношения механических свойств плакирующего и основного слоев, от соотношения их толщин и от того, и растянутой или сжатой зоне гiba находится плакирующий слой [2].

За величину пружинений обычно принимают возникающую от действия обратного изгибающего момента упругую деформацию.

Рассмотрим влияние температуры нагрева на упругое пружинение двухслойных листов (полос) при гибке.

Деформационное упрочнение, вызванное затрудненностью перемещения дислокаций в материале, характеризует модуль деформационного упрочнения $D_c = \partial\sigma/\partial\varepsilon$ – производная напряжения по деформации, изменение которого определяет геометрию диаграммы деформации. Модуль деформационного упрочнения уменьшается с повышением температуры, при которой происходит деформирование [1].

Принимаем, в соответствии с [1], что влияние упрочнения при гибке аппроксимируется степенной функцией $\sigma = A\varepsilon^n$, где A – коэффициент,

характеризующий механические свойства металла; n – коэффициент, характеризующий степень упрочнения металла. Известно также [1], что характер этой зависимости сохраняется при повышении температуры нагрева листа (полосы) при гибке.

С повышением температуры коэффициент A , так же, как и коэффициент n , уменьшается, что следует из уменьшения, с повышением температуры, пределов текучести и прочности металла.

Данную закономерность иллюстрирует табл., в которой приведены значения коэффициентов A и n и модуля упругости E в зависимости от температуры нагрева под гибку для некоторых сталей, наиболее широко используемых в производстве двухслойных коррозионностойких листов [7–9].

Таблица. Константы кривой упрочнения и модуль упругости некоторых сталей в зависимости от температуры [7–9]

Сталь	Константы кривой упрочнения и модуль упругости	Температура, °С			
		20	400	600	800
Сталь 3	A , МПа	477	222,6	163,5	64,8
	n	0,141	0,03	0,039	0,037
	ν	0,0057	0,0037	0,0035	0,0017
	$E \cdot 10^{-5}$, МПа	2,1	1,73	1,35	1,1
09Г2С	A	545	559	293	
	n	0,098	0,175	0,116	
	ν	0,007	0,0066	0,0037	
	$E \cdot 10^{-5}$, МПа	2,1	1,75	1,5	
08Х13	A , МПа	555	499,7	184	85,2
	n	0,146	0,093	0,924	0,033
	ν	0,0067	0,0057	0,0032	0,0016
	$E \cdot 10^{-5}$, МПа	2,1	1,93	1,7	1,5
12Х18Н10Т	A , МПа	670	567	466	393
	n	0,2	0,1494	0,179	0,165
	ν	0,0071	0,0065	0,0055	0,0046
	$E \cdot 10^{-5}$, МПа	2,02	1,77	1,6	1,5

Влияние температуры нагрева на пружинение при гибке можно представить отношением величины изменения кривизны вследствие пружинения при данной температуре нагрева к тому же параметру при комнатной температуре [1]. То есть, если мы хотим уменьшить пружинение за счет нагрева, нам нужно, при постоянном значении величины изменения кривизны при комнатной температуре, уменьшать, путем повышения температуры и нахождения оптимальной, величину изменения кривизны при данной температуре.

В работе [8] приведены зависимости для определения радиусов изгиба листа с учетом нагрева:

– до пружинения R_r

$$R_r = \frac{R_{ост}}{1 + \nu^T \left(\frac{R_{ост}}{\delta} \right)^{1-n^T}}, \quad (1)$$

– и остаточного радиуса $R_{ост}$

$$R_{ост} = \frac{R_r}{1 - \nu^T \left(\frac{R_r}{\delta} \right)^{1-n^T}}, \quad (2)$$

где ν^T – коэффициент, зависящий от механических свойств материала (табл. 1) [8].

В соответствии с теоремой о разгрузке [10], связь между напряжениями и деформациями при разгрузке подчиняется закону Гука, то есть разгрузка происходит в условиях упругого деформирования, откуда кривизна пружинения, возникающая при разгрузке [11]

$$\kappa' = \frac{1}{R_{пр}} = \frac{M}{EJ}, \quad (3)$$

где $R_{пр}$ – радиус кривизны изгибаемого листа при пружинении (или, по терминологии [10], изменение кривизны при разгрузке $1/\rho_{разгр}$); E – модуль упругости при комнатной температуре (табл. 1 [8]); J – момент инерции площади поперечного сечения прямоугольной полосы относительно нейтральной поверхности.

Зная, что момент M при пластическом изгибе элемента, имеющего в поперечном сечении прямоугольную форму, можно представить в виде [1]

$$M = 2bR_{пр}^2 S_{\sigma-\varepsilon}, \quad (4)$$

где $S_{\sigma-\varepsilon}$ – статический момент относительно оси σ площади диаграммы $\sigma-\varepsilon$, ограниченной деформацией крайнего волокна ε_δ , где δ – толщина листа, определяемый по формуле

$$S_{\sigma-\varepsilon} = \int_0^{\varepsilon_\delta} \sigma \varepsilon d\varepsilon. \quad (5)$$

Откуда

$$\kappa' = \frac{2bR_{пр}^2 S_{\sigma-\varepsilon}}{EJ}. \quad (6)$$

Таким образом, отношение величины изменения кривизны вследствие пружинения при данной температуре нагрева κ_T' к тому же параметру при комнатной температуре κ' можно представить в виде

$$\frac{\kappa_T'}{\kappa'} = \frac{S_{\sigma-\varepsilon T}}{S_{\sigma-\varepsilon}} \frac{E}{E_T}, \quad (7)$$

где $S_{\sigma-\varepsilon T}$ – статический момент при температуре нагрева T , E_T – модуль упругости при температуре нагрева T .

Подставляя в зависимость (5) выражение для аппроксимирующей кривой упрочнения, получаем для комнатной температуры (постоянной интегрирования C для упрощения пренебрегаем)

$$S_{\sigma-\varepsilon} = \int_0^{\delta} \sigma \varepsilon d\varepsilon = \int_0^{\delta} \varepsilon A \varepsilon^n d\varepsilon = \int_0^{\varepsilon_{\delta}} A \varepsilon^{n+1} d\varepsilon = \frac{A}{n+2} \varepsilon_{\delta}^{n+2}, \quad (8)$$

для температуры T , соответственно

$$S_{\sigma-\varepsilon T} = \frac{A^T}{n^T + 2} \varepsilon_{\delta}^{n^T + 2}, \quad (9)$$

Откуда

$$\frac{\kappa_T'}{\kappa'} = \frac{S_{\sigma-\varepsilon T}}{S_{\sigma-\varepsilon}} \frac{E}{E_T} = \frac{A^T \varepsilon_{\delta}^{n^T + 2}}{n^T + 2} \cdot \frac{n+2}{A \varepsilon_{\delta}^{n+2}} = \frac{A^T}{A} \cdot \frac{n+2}{n^T + 2} \cdot \varepsilon_{\delta}^{n^T - n} \cdot \frac{E}{E_T}, \quad (10)$$

Методика определения констант A и n кривой упрочнения для двухслойных листов приведена в работе [2].

Отметим, что в общем случае относительная деформация данного слоя изгибаемого листа определяется по зависимости [2]

$$\varepsilon = \frac{\rho - \rho_{\sigma}}{\rho}, \quad (11)$$

где ρ – текущий радиус; ρ_{σ} – радиус нейтрального слоя при изгибе.

При гибке с большими радиусами закруглений определяется не угол пружинения, а упругое изменение радиуса после гибки. Остаточная деформация крайних волокон определяется по приближенной формуле [12]

$$\varepsilon_{\delta} = \frac{1}{\frac{2r}{\delta} + 1} \quad (12)$$

Отметим, что свойства биметалла (в данном случае, двухслойного металла) можно прогнозировать на основе известных свойств его составляющих (на основе правила смесей [13]).

Величина модуля упругости для двухслойного листа может быть определена по зависимости [13]:

$$E_{12} = \frac{E_2 \left[1 - a \left(\left(1 - \frac{E_1 (1 - \mu_2)}{E_2 (1 - \mu_1)} \right) \right) \right]}{1 - \mu_2 a (1 - m)}, \quad (13)$$

где E_1 и E_2 – модули упругости металлов компонентов (плакирующего и основного соответственно); $a = \delta_{01}/\delta_0$ – отношение исходной толщины одного из компонентов к исходной толщине всей композиции; μ_1 и μ_2 – коэффициенты Пуассона металлов компонентов; Коэффициент m равен [13]

$$m = \frac{\mu_1 \cdot (1 - \mu_2)}{\mu_2 \cdot (1 - \mu_1)}. \quad (14)$$

Очевидно, что по зависимости (13) аналогично определяется модуль упругости для двухслойного листа и при данной температуре нагрева T . Значения модуля упругости E в зависимости от температуры T приведены в табл. Зная изменение модуля упругости второго рода G данного металла в зависимости от температуры T [9], и используя зависимость

$$G = \frac{E}{2(1 - \mu)}, \quad (15)$$

можно определить коэффициент Пуассона этого металла для данной температуры T .

Зависимость угла пружинения от температуры нагрева двухслойных листов под гибку исследовалась на примере полученных прокаткой двухслойных листов коррозионностойкого биметалла 09Г2С + 12Х18Н10Т.

Отметим, что данное сочетание весьма интересно и перспективно, так как позволяет использовать повышенную прочность стали основного слоя и коррозионную стойкость стали плакирующего слоя. Назначение стали 09Г2С – различные детали и элементы сварных металлоконструкций, аппараты и сосуды химической промышленности, к которым предъявляются требования повышенной прочности и работающие при температуре от $-70 \dots +425^\circ\text{C}$ под давлением [9].

Толщина двухслойных листов составляла 10 мм, толщина плакирующего слоя, в соответствии с ГОСТ 10885-85 Сталь листовая горячекатаная

двухслойная коррозионностойкая. Технические условия, составляла 2,5 мм (нормальная толщина). Отношение толщины плакирующего слоя к толщине двухслойного листа $a = \delta_1/\delta = 0,25$. Выполнялась гибка на внутренний радиус 80 мм, то есть относительный радиусгиба $\frac{r}{\delta} = 8$.

Проводился нагрев под гибку в диапазоне от комнатной температуры до 400 °С, с интервалом 50 °С.

Гибка двухслойных листов выполнялась как плакирующим слоем наружу, так и плакирующим слоем внутрь.

Результаты измерения углов пружинения приведены на рис.

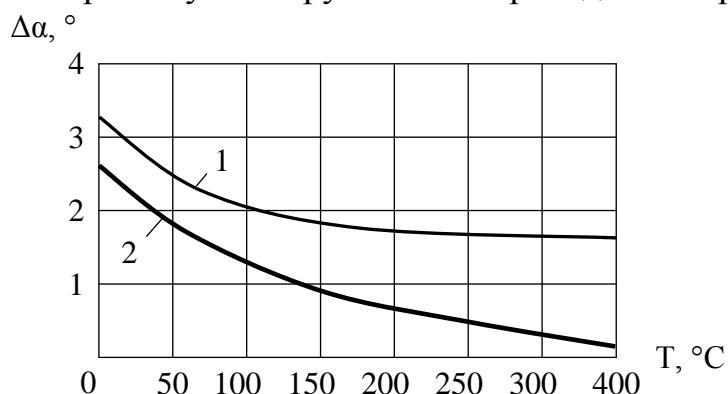


Рис. – Влияние температуры гибки листового биметалла 09Г2С + 12Х18Н10Т на угол пружинения: 1 – гибка плакирующим слоем наружу; 2 – гибка плакирующим слоем внутрь

Из рис. следует, что угол пружинения коррозионностойкого биметалла 09Г2С + 12Х18Н10Т в процессе пластического изгиба зависит (при прочих равных условиях) от того, наружу или внутрь плакирующим слоем выполняется гибка. При гибке плакирующим слоем внутрь пружинение практически незаметно при нагреве листа до 400°С, при гибке плакирующим слоем наружу свести практически до нуля угол пружинения повышением температуры не удастся.

Выводы. 1. Установлено, что упругое пружинение при нагреве будет меньше, чем пружинение при изгибе в холодном состоянии. Разработаны расчетные зависимости, показывающие, что разница будет увеличиваться с увеличением кривизны изгибаемого листа (полосы) и температуры нагрева.

2. Для коррозионностойкого биметалла 09Г2С + 12Х18Н10Т в процессе пластического изгиба угол пружинения зависит (при прочих равных условиях) от того, наружу или внутрь плакирующим слоем выполняется гибка (на всем диапазоне температур, при которых выполнялась гибка, – от комнатной до +400 °С, угол пружинения больше при гибке плакирующим слоем наружу). Оптимальной температурой гибки в этом диапазоне при гибке плакирующим

слоем внутрь является 400°C , при гибке плакирующим слоем наружу при этой температуре угол пружинения минимален ($\Delta\alpha \approx 2^{\circ}$).

Список литературы: 1. *Лысов М.И.* Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки / М.И. Лысов. – М.: Машиностроение, 1966. – 236 с. 2. *Чечета И.А.* О некоторых особенностях технологии пластического изгиба биметалла / И.А. Чечета // Кузнечно-штамповочное производство. – 1960. – № 12. – С. 11-13. 3. *CASTI Handbook of Cladding Technology* / Liane M. Smith, Mario Celant. – Edmonton: CASTI Publishing Inc., 2000. – 267 p. 4. *Metal Forming Practise: Processes – Machines – Tools* / Tschätsch H., Koth A. – Berlin: Springer-Verlag, 2006. – 415 p. 5. *Altan T.* Metal Forming Handbook. – Berlin: Springer-Verlag, 1998. – 573 p. 6. *Шевелкин Б.Н.* Обработка давлением листовой двухслойной стали / Б.Н. Шевелкин, А.П. Голованова // Прогрессивная технология в химическом машиностроении. Труды НИИХиммаша. – Вып. 19. – 1956. – С. 47–67. 7. *Берлинер Ю.И.* Гибка толстых листов и правка обечаек в горячем состоянии / Ю.И. Берлинер. – Химическое и нефтяное машиностроение. – 1971. – № 4. – С. 27-29. 8. *Берлинер Ю.И.* Технология химического и нефтяного машиностроения / Ю.И. Берлинер, Ю.А. Балашов. – М.: Машиностроение, 1976. – 256 с. 9. *Марочник сталей и сплавов* / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др.; Под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с. 10. *Зубцов М.Е.* Листовая штамповка / М.Е. Зубцов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 432 с. 11. *Мошнин Е.Н.* Гибка и правка на ротационных машинах. Технология и оборудование / Е.Н. Мошнин. – М.: Машиностроение, 1967. – 272 с. 12. *Романовский В.П.* Справочник по холодной штамповке / В.П. Романовский. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. – 520 с. 13. *Биметаллы* / Л.Н. Дмитров, Е.В. Кузнецов, А.Г. Кобелев [и др.]. – Пермское книжное изд., 1991. – 415 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Lysov M.I.* Teoriya i raschet prozessov izgotovleniya detaley metodami gibki M.I. Lysov. – Moscow: Mashinostroenie, 1966. – 236 P. 2. *Checheta I.A.* O nekotorych osobennostyach tehnologii plasticheskogo izgiba bimetalla I.A. Checheta Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. – 1960. – No 12. – P. 11-13. 3. *CASTI Handbook of Cladding Technology* Liane M. Smith, Mario Celant. – Edmonton: CASTI Publishing Inc., 2000. – 267 p. 4. *Metal Forming Practise: Processes – Machines – Tools* Tschatsch H., Koth A. – Berlin: Springer-Verlag, 2006. – 415 p. 5. *Altan T.* Metal Forming Handbook. – Berlin: Springer-Verlag, 1998. – 573 r. 6. *Shevelkin B.N.* Obrabotka davleniem listovoy dvuchsloynoy stali B.N. Shevelkin, A.P. Golovanova Progressivnaya tehnologiya v chimicheskom mashinostroenii. Trudy NIICHimmasha. – Vyp. 19. – 1956. – P. 47–67. 7. *Berliner Yu.I.* Gibka tolstych listov i pravka obechaek v goryachem sostoyanii Yu.I. Berliner. – Chimicheskoe i neftyanoe mashinostroenie. – 1971. – No 4. – P. 27-29. 8. *Berliner Yu.I.* Tehnologiya chimicheskogo i neftyanogo mashinostroeniya Yu.I. Berliner, Yu.A. Balashov. – Moscow: Mashinostroenie, 1976. – 256 P. 9. *Marochnik staley i splavov* V.G. Sorokin, A.V. Volosnikova, P.A. Vyatkin i dr.; Pod obsch. red. V.G. Sorokina. – Moscow: Mashinostroenie, 1989. – 640 P. 10. *Zubzov M.E.* Listovaya shtampovka M.E. Zubzov. – Leningrad: Mashinostroenie, 1980. – 432 P. 11. *Moshnin E.N.* Gibka i pravka na rotazionnykh mashinach. Tehnologiya i oborudovanie E.N. Moshnin. – Moscow: Mashinostroenie, 1967. – 272 P. 12. *Romanovskiy V.P.* Spravochnik po choldnoy shtampovke V.P. Romanovskiy. – Leningrad: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1979. – 520 P. 13. *Bimetally* L.N. Dmitrov, E.V. Kuznezov, A.G. Kobelev [i dr.]. – Permskoe knizhnoe izd., 1991. – 415 P.

Поступила (received) 29.10.2014