

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСХОДНЫХ ТОЛЩИН СЛОЕВ ПРИ ПРОКАТКЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПАКЕТОВ ПО УСЛОВИЯМ СОВМЕСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

В. Г. Загорянский

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: zagor_vlad@ukr.net

При прокатке биметаллических пакетов, состоящих из трех слоев (в данном случае мягкий-твердый-мягкий) возникает задача нахождения исходных толщин слоев (толщины слоев в готовом биметалле известны). Решение задачи основано на известных положениях теории совместной пластической деформации разных металлов. Толщина мягкого слоя в биметаллическом пакете зависит от соотношения толщин слоев в пакете после прокатки, внешнего и межслойного трения и механических свойства металлов слоев. Совместная деформация будет происходить, когда сопротивление совместной деформации станет меньше сопротивления частичной деформации. Толщина исходного биметаллического пакета находится из условия начала совместной деформации слоев при прокатке. Создана оптимизационная модель, которая реализована в программе Microsoft Excel. Исходная толщина биметаллического пакета находится с помощью инструмента Поиск решения (Solver).

Ключевые слова: оптимизационная модель, прокатка, биметаллический пакет, толщины слоев, совместная деформация.

МОДЕЛЮВАННЯ ВИХІДНИХ ТОВЩИН ШАРІВ ПРИ ПЛЮЩЕННІ БІМЕТАЛІЧНИХ ПАКЕТІВ ЗА УМОВ СПІЛЬНОЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ

В. Г. Загорянский

Кременчугський національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: zagor_vlad@ukr.net

При плющенні биметалічних пакетів, що складаються з трьох шарів (в даному випадку м'який-твердий-м'який) виникає задача знаходження початкової товщини шарів (товщини шарів в готовому биметалі відомі). Рішення задачі ґрунтується на відомих положеннях теорії спільної пластичної деформації різних металів. Товщина м'якого шару у биметалічному пакеті залежить від співвідношення товщини шарів в пакеті після плющення, зовнішнього і міжшарового тертя і механічних властивості металів шарів. Спільна деформація відбуватиметься, коли опір спільної деформації стане менше опору часткової деформації. Товщина початкового биметалічного пакету знаходиться з умови початку спільної деформації шарів при плющенні. У статті створена оптимізаційна модель, яка реалізована в програмі Microsoft Excel. Початкова товщина биметалічного пакету знаходиться за допомогою інструменту Пошук рішення (Solver).

Ключові слова: оптимізаційна модель, плющення, биметалічний пакет, товщина шарів, спільна деформація.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Необходимым условием получения качественной продукции при прокатке биметаллических листов и полос является разработка технологии, обеспечивающей соответствие толщин слоев в готовом листе или полосе диапазону, указанному в требованиях соответствующего стандарта или технических условий.

Прокатка биметаллических пакетов, состоящих из трех слоев (твердый-мягкий-твердый или мягкий-твердый-мягкий), является одним из наиболее распространенных случаев прокатки биметаллов.

Для данного случая одно из решений задачи нахождения толщин слоев после прокатки основано на энергетическом методе.

Согласно принципу Журдена [1], фактическое положение границы раздела слоев полученного прокаткой биметалла определяется минимальным значением мощности, расходуемой в очаге деформации. Однозначно связанная с положением границы раздела слоев толщина на выходе из валков среднего слоя h_{11} в трехслойном пакете определяется в соответствии с этим (по известной методике В.Г. Дорогобида и Н.Н. Ильиной [2]) по зависимости

$$\frac{dN}{dh_{11}} = \frac{dN_1}{dh_{11}} + \frac{dN_2}{dh_{11}} + \frac{dN_f}{dh_{11}} + \frac{dN_p}{dh_{11}} + \frac{dN_{C1}}{dh_{11}} + \frac{dN_{C2}}{dh_{11}}, \quad (1)$$

где N_1 – мощность внутренних сил в среднем слое; N_2 – мощность внутренних сил в наружных слоях; N_f – мощность внешнего трения; N_p – мощность межслойного трения; N_{C1} и N_{C2} – мощности сил среза соответственно в среднем и наружных слоях во входном сечении очага деформации.

Полная мощность в очаге деформации зависит от соотношения толщин слоев в пакете после прокатки. Диапазон соотношения толщин известен (определяется требованиями соответствующего стандарта или технических условий на биметаллический прокат). Реально получаемая толщина среднего слоя биметалла находится из условия минимальной полной мощности прокатки.

Проводить расчет толщин слоев получаемых трехслойных биметаллических пакетов, не прибегая к громоздким и трудоемким расчетам по методике В.Г. Дорогобида и Н.Н. Ильиной [2], позволяют оптимизационная модель и ее программная реализация, приведенные в работе [3]. Нахождение оптимальных параметров проводилось с использованием средств программы Microsoft Excel. Толщина среднего слоя в пакете после прокатки находилась с помощью инструмента Поиск решения (Solver) программы Microsoft Excel.

Вычисленные по модели, предложенной в работе [3] и по методике В.Г. Дорогобида и Н.Н. Ильиной [2] значения толщин слоев пакета после прокатки практически совпадают, что доказывает адекватность предложенной модели и ее программной реализации.

В данной работе рассматривается случай трехслойного пакета с твердым внутренним слоем и двумя мягкими плакирующими наружными слоями одинаковой толщины – так называемый структурно симметричный пакет, по терминологии работы [2]. Отметим, что термины "твердый и "мягкий" по отношению к слоям биметалла означают, что при данных условиях деформации у металлов слоев соответственно большее и меньшее значение предела текучести. Таким образом, по принятой в практике получения и обработки давлением биметаллов терминологии, рассматривается случай пакета М–Т–М. К таким композициям относятся широко используемые или перспективные сочетания металлов медь-алюминий-медь (основная область применения – электротехническая и радиотехническая промышленность), латунь-сталь-латунь (широкая область применения), алюминий-сталь-алюминий, медь-коррозионностойкая сталь-медь (антифрикционные биметаллы) и др. [4, 5].

Используя аппарат теории совместной пластической деформации разных металлов, разработанный исследователями Магнитогорского политехнического института [2, 6, 7], а также модели прокатки, предложенные в работах иностранных исследователей [8, 9], рационально решить обратную к рассмотренной в работе [3] задачу – создать оптимизационную модель для расчета исходных толщин составляющих слоев из условия минимальной толщины пакета, при которой обеспечивается начало совместной пластической деформации слоев.

Цель работы – на основе выведения расчетной зависимости для определения исходных толщин слоев заготовки (и всего пакета) для получения биметаллического листа (полосы) с определенным соотношением толщины основного (среднего) слоя и плакирующего слоя (наружных слоев), создать оптимизационную модель с учетом соответствующих ограничений и выполнить проверочный расчет по ней с использованием инструмента Поиск решения программы Microsoft Excel.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Оптимизируемым параметром (целевой функцией модели) будет исходная толщина биметаллического пакета, при которой начинается совместная пластическая деформация слоев. В этом смысле имеет место совпадение с требованиями экономии мягкого плакирующего металла (как правило, это более дорогие цветные металлы и сплавы); толщина плакирующего мягкого слоя должна быть минимальной при соблюдении остальных ограничений.

При прокатке биметалла в качестве сопротивления металла пластической деформации рекоменду-

ется [2] принимать усредненный по всему очагу деформации в пределах каждого слоя предел текучести на сдвиг.

Принимая, что главные оси напряжений в вертикальном элементе i -го слоя подвергаемого прокатке биметалла соответствуют вертикальным и горизонтальным осям σ_1 и σ_3 , используя уравнение пластичности для двухмерной (плоской) деформации, запишем выражение для определения сопротивления деформации i -го слоя:

$$k_i = \sigma_{1i} - \sigma_{3i} = 1,15\sigma_{si}, \quad (2)$$

где σ_{si} – предел текучести i -го слоя при линейном напряженном состоянии.

В самом простом случае принимается [10], что пластическая деформация при прокатке биметаллического пакета происходит без упрочнения. Более точное решение получается при использовании модели линейно-упрочняющейся среды [5]. В этом случае сопротивление сдвигу i -го слоя биметалла определяется по зависимости

$$\tau_{s_i} = A_i + E_i \varepsilon_i, \quad (3)$$

где A_i – начальный предел текучести металла i -го слоя при сдвиге (сопротивление сдвигу); E_i – модуль упрочнения металла i -го слоя; ε_i – относительная деформация i -го слоя.

Многочисленные исследования позволили установить основные факторы, определяющие неравномерность деформирования слоев биметалла при прокатке. К ним традиционно относят [4] отношение исходных толщин слоев и порядок расположения слоев в пакете, отношение сопротивления деформации металлов слоев, параметры очага деформации (отношение длины очага деформации к толщине прокатываемого биметалла), контактные и межслойные силы трения.

Вполне логично предположить, и это подтверждается экспериментально, что при прокатке биметаллических пакетов будет в большей степени деформироваться слой металла, обладающего меньшим сопротивлением деформированию.

Отмечается [5], что из-за сложности учета влияния основных факторов на совместную пластическую деформацию биметалла оценить его сопротивление деформации аналитическим методом пока не представляется возможным. Сопротивление деформации биметаллов при прокатке обычно связывают с механическими свойствами металлов слоев или с их сопротивлением деформации при подобных условиях деформации.

Прочная связь между слоями биметалла или наличие трения между ними при неравномерной деформации вызывает появление дополнительных напряжений – сжимающих в слое с меньшим сопротивлением деформации и растягивающих в слое с большим сопротивлением деформации. Дополнительные напряжения способствуют уменьшению неравномерности деформации слоев биметалла.

На распределение деформаций по объему биметалла при прокатке существенно влияют силы трения на поверхности контакта инструмента (валков) и обращенных к ним поверхностям биметаллического пакета. Как указывается в работе [2], внешнее и межслойное трение – основная причина разнотолщинности первого рода (общего искривления межслойных поверхностей). Разнотолщинность второго (из-за местных искривлений межслойных поверхностей) и третьего рода (из-за увеличения межслойной шероховатости) вызывается непостоянством, колебаниями, флуктуациями по контактными поверхностям внешнего и межслойного трения. Разнотолщинность третьего рода вызывается также зернистым строением металла.

Когда силы контактного трения способствуют деформации приконтактных слоев, их считают активными, когда затрудняют деформацию – реактивными. Влияние этих сил определяется не только их направлением, но и отношением толщин слоев, то есть областью действия сил трения в поперечном сечении биметалла, а также параметрами очага деформации [5]. Из этого следует, что регулировать распределение деформаций между слоями можно путем изменения условий контактного трения при прокатке биметалла.

Известно [4], что контактные силы трения определяются сопротивлением металла пластической деформации, коэффициентом внешнего трения и формой очага деформации.

Принимаем, что силы внешнего и межслойного трения распределены, в соответствии с допущениями работы [5], вдоль дуги контакта равномерно.

В соответствии с этим, в модели очага деформации при плоской прокатке биметалла композиции М+Т+М принято [5], что касательные напряжения в месте контакта с валком и на межслойной границе постоянны и задаются по закону Зибеля:

$$\tau_i = \mu_i A_M, \quad (4)$$

где μ_i – коэффициент, характеризующий трение на соответствующей поверхности, A_M – начальный предел текучести при сдвиге (сопротивление сдвигу) металла мягкого (плакирующего) слоя.

В общем виде речь идет о сопротивлении сдвигу менее прочного компонента пары трения.

Величина A_M определяется по закону упрочнения для металла мягкого слоя. Коэффициенты трения, по данным [5], лежат в диапазоне $0 < \mu_i \leq 0,58$.

Отметим, что на наш взгляд правильнее разделять касательные напряжения вдоль дуги контакта и касательные напряжения на межслойной границе, по которой существует разрыв скоростей. В первом случае силы трения на контакте i -го слоя с инструментом (касательные напряжения) вдоль дуги контакта постоянны:

$$\tau_i = \mu_i A_M = const. \quad (5)$$

В этом случае коэффициент трения между наружными слоями биметалла и инструментом будет лежать в границах $0 < \mu_i < 1$.

Во втором случае контактные напряжения на межслойной границе будут равными $\mu_{12} A_M$, где μ_{12} – коэффициент межслойного трения.

Как указывается в работе [2], когда речь идет о внешнем и межслойном трении соответственно, в зависимости (4) и (5) входят показатели внешнего (μ_2) и межслойного ρ (μ_{12}) трения. В первом случае его следует отличать от коэффициента внешнего трения, являющегося коэффициентом пропорциональности между напряжением внешнего трения и контактным давлением. Минимальное значение показателя внешнего трения определяется условием захвата биметаллического пакета (листа, полосы) валками, а максимальное соответствует состоянию прекращения скольжения по контактной поверхности (началу прилипания), при котором уже нельзя использовать гипотезу плоских сечений. Показатель межслойного трения также следует отличать от коэффициента межслойного трения. В общем случае оба показателя лежат в пределах от нуля до единицы.

Теория совместной пластической деформации разнородных металлов (СПДРМ) рассматривает [6, 7, 12] три типа деформации – избирательную (частичную), при которой происходит только деформация мягких компонентов биметалла при упругом состоянии остальных, полную неравномерную СПДРМ, при которой происходит совместная неравномерная пластическая деформация всех компонентов с проскальзыванием или без него слоев друг по другу, и совместную равномерную пластическую деформацию всех компонентов без проскальзывания слоев друг по другу.

В работе [12] приводится номограмма для приближенного расчета выклинивания областей избирательной деформации при сжатии биметаллических цилиндров по схеме М–Т–М. Эта номограмма позволяет определить минимальное значение межслойного коэффициента трения μ_{12} для безоблойного сжатия слоев. Указывается, что в случае соединения (сцепления) слоев этот коэффициент равен 0,5. Усложнение методики идеальной осадки различными влияющими факторами позволило перейти к расчету деформаций слоев при прокатке [10].

Выражение для сопротивления избирательной (частичной) деформации слоев (первый тип) известно [6, 10]:

$$k_M \left(1 + \frac{B(f + \rho)}{2h_{02}} \right), \quad (6)$$

где k_M – сопротивление деформации металла мягкого слоя (наружные плакирующие слои пакета); f и ρ – соответственно показатели внешнего и межслойного трения; h_{02} – общая толщина мягкого слоя (наружных плакирующих слоев).

Выражение для сопротивления совместной равномерной пластической деформации слоев (третий тип) имеет вид [5, 9]:

$$k_T \frac{h_{01}}{h_0} + k_M \frac{h_{02}}{h_0}, \quad (7)$$

где k_T – сопротивление деформации металла твердого слоя (средний основной слой пакета); h_{01} – толщина твердого слоя (среднего основного слоя); h_0 – исходная толщина биметаллического пакета.

В соответствии с законом наименьшего сопротивления [6], совместная пластическая деформация слоев при прокатке биметаллического пакета будет иметь место, когда сопротивление совместному пластическому деформированию станет меньше сопротивлению избирательной деформации, то есть значение по формуле (7) будет меньше или равно значению по формуле (6).

Приравнявая выражения (6) и (7) в сечении входа полосы в валки и обозначив

$$a_T = \frac{h_{01}}{h_{01} + h_{02}} = \frac{h_{01}}{h_0}, \quad (8)$$

и

$$a_M = \frac{h_{02}}{h_{01} + h_{02}} = \frac{h_{02}}{h_0}, \quad (9)$$

и, зная что

$$\frac{h_{01}}{h_{01} + h_{02}} + \frac{h_{02}}{h_{01} + h_{02}} = \frac{h_{01}}{h_0} + \frac{h_{02}}{h_0} = a_M + a_T = 1, \quad (10)$$

получаем выражение для толщины мягкого слоя (наружные слои пакета), при которой будет отсутствовать избирательная деформация

$$h_{02} \leq \frac{k_M B(f + \rho)}{2a_T(k_T - k_M)}, \quad (11)$$

где a_T – доля твердого слоя в биметалле, a_M – доля мягкого слоя в биметалле.

Отметим, что на основе правила смесей [11] свойства биметалла можно прогнозировать на основе известных свойств его составляющих по следующей линейной зависимости (для биметалла, состоящего из двух слоев)

$$y_{12} = y_1 a + y_2 (1 - a), \quad (12)$$

где y_{12} – прогнозируемое свойство биметалла; y_1 и y_2 – свойства исходных составляющих биметалла; $a = h_{01}/h_0$ – отношение исходной толщины одного из компонентов к исходной толщине всей композиции.

Таким образом, предел текучести биметалла, состоящего из двух слоев, на основе значений пределов текучести σ_{s1} и σ_{s2} его составляющих и соотношения их толщин можно оценить по зависимости

$$\sigma_{s12} = \sigma_{s1} a + \sigma_{s2} (1 - a). \quad (13)$$

Для m -компонентного пакета текущий предел текучести всего пакета при продольном сжатии равен [7]

$$\sigma_{s(1...m)} = \sum_{i=1}^m a_i \sigma_{si}, \quad (14)$$

где $a_i = h_{0i}/h_0$ – отношение исходной толщины каждого из компонентов к исходной толщине всей композиции.

Таким образом, в предлагаемой оптимизационной модели исходными данными будут следующие: ширина B получаемого прокаткой биметаллического листа или полосы; определяемые по зависимости (2) сопротивления деформации металлов слоев (пределы текучести при плоской деформации) – твердого k_T и мягкого k_M ; толщина получаемого биметалла или толщины слоев в нем (или доли твердого a_T и мягкого слоев и a_M в биметалле); показатели внешнего f и межслойного трения ρ (или, по зависимости (4), μ_2 и μ_{12} соответственно).

Переменными модели будут исходные толщины слоев пакета (для рассматриваемого случая это h_{01} и h_{02} – толщина среднего слоя и общая толщина наружных (плакирующих) слоев).

Если толщина исходного пакета не превосходит критической толщины $h_{0кр}$, то происходит частичная (избирательная) деформация только мягкого компонента, когда же толщина исходного пакета больше критической толщины $h_{0кр}$, начинается совместная равномерная деформация мягкого и твердого компонентов [6].

Целевой функцией, максимальное значение которой нужно найти, является толщина исходного пакета (критическая), с которой происходит полное "выклинивание" (по терминологии работ [6, 7, 12]) области избирательной деформации, и с которой, соответственно, начинается совместная пластическая деформация:

$$h_{0кр} = \frac{h_{01}^2}{h_{01} - \frac{B(f + \rho)}{2 \left(\frac{k_T}{k_M} - 1 \right)}} \rightarrow \max. \quad (15)$$

На основе зависимостей (8)–(10) получим

$$h_{01} = \frac{a_T}{a_M} h_{02}. \quad (16)$$

Выражение (16) представляет собой ограничение на соотношение твердого и мягкого слоев в исходном пакете.

Таким образом, будут следующие ограничения:

- на толщину мягкого слоя, при которой начинается совместная деформации (зависимость (11));
- на соотношение твердого и мягкого слоев в исходном пакете (зависимость (16));
- на неотрицательность переменных:

$$h_{01} \geq 0, \quad h_{02} \geq 0. \quad (17)$$

Тестовый пример (значения соответствуют приведенным в примере работы [10]): прокаткой нужно получить биметаллический лист шириной $B = 240$ мм с долями твердого $a_T = 0,6$ и мягкого слоев $a_M = 0,4$. Сопротивления деформации металла слоев $k_T = 350$

МПа и $k_M = 50$ МПа. Коэффициент внешнего трения $f = 0,1$, межслойного трения $\rho = 0,5$.

Вид рабочего листа с введенными исходными данными и зависимостями модели приведен на рис. 1.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Исходные данные		Переменные				Ограничения	
2	Ширина листа (полосы) В, мм	240	h_{02} , мм	20			20	
3	Сопrotивление деформации металла твердого слоя k_T , МПа	350	h_{01} , мм	30			30	
4	Сопrotивление деформации металла мягкого слоя k_M , МПа	50						
5	Доля твердого слоя a_1	0,6						
6	Доля мягкого слоя a_2	0,4						
7	Коэффициент внешнего трения, f	0,1						
8	Коэффициент межслойного трения, ρ	0,5						
9								
10	Целевая функция (крит. исходная толщина пакета) h_{0np} , мм	50						

Рисунок 1 – Вид рабочего листа Microsoft Excel с введенными исходными данными, выражением для целевой функции и ограничениями тестового примера

Окно инструмента Поиск решения программы Microsoft Excel с введенными параметрами рассматриваемого примера показано на рис. 2.

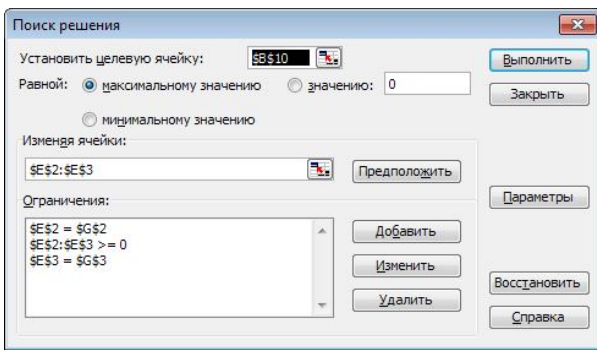


Рисунок 2 – Вид окна инструмента Поиск решения с введенными параметрами примера

Результаты выполнения оптимизации модели инструментом Поиск решения показан на рис. 3.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Исходные данные		Переменные				Ограничения	
2	Ширина листа (полосы) В, мм	240	h_{02} , мм	20			20	
3	Сопrotивление деформации металла твердого слоя k_T , МПа	350	h_{01} , мм	30			30	
4	Сопrotивление деформации металла мягкого слоя k_M , МПа	50						
5	Доля твердого слоя a_1	0,6						
6	Доля мягкого слоя a_2	0,4						
7	Коэффициент внешнего трения, f	0,1						
8	Коэффициент межслойного трения, ρ	0,5						
9								
10	Целевая функция (крит. исходная толщина пакета) h_{0np} , мм	50						

Рисунок 3 – Результаты выполнения оптимизации модели на рабочем листе Excel

В работе [10] приведены результаты расчета для рассматриваемого примера. Отметим, что расчет по приведенным в работе [10] зависимостям дает толщину исходного пакета 50 мм, что соответствует толщине, полученной по оптимизационной модели.

Компьютерное моделирование по предложенной оптимизационной модели показывает полное соответствие с результатами расчетов по тестовому

примеру, приведенному в работе [10], что подтверждает адекватность модели и позволяет ее применение для решения задач подобного класса и наглядного моделирования.

ВЫВОДЫ. Задачу нахождения исходных толщин (перед прокаткой) составляющих слоев структурно симметричных трехслойных биметаллических пакетов М–Т–М рационально представить в виде оптимизационной модели. В этой модели варьируемыми переменными будут исходные толщины составляющих слоев пакета, а целевой функцией – минимально возможная исходная толщина пакета, которая соответствует условию начала совместной пластической деформации. Такая модель относится к классу задач анализа "что-если", для решения которых используются итерационные алгоритмы, реализуемые в различных программных пакетах (в данном случае использован инструмент Поиск решения программы Microsoft Excel). Разработанная модель и ее программная реализация позволяют автоматизировать решение задач данного типа и проводить наглядное моделирование.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория обработки металлов давлением (Вариационные методы расчета усилий и деформаций) / И.Я. Тарновский, А.А. Поздеев, О.А. Ганаго и др. – М.: Metallurgizdat, 1963. – 672 с.
2. Теория прокатки слоистых металлов / В.Г. Дорогобид, Н.Н. Ильина. – Магнитогорск: МГТУ, 1998. – 81 с.
3. Моделирование толщин слоев после прокатки симметричных биметаллических пакетов на основе энергетического подхода / В.Г. Загорянский, О.В. Загорянский // Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. – Краматорск: ДГМА, 2013. – № 2 (12Е). – С. 63–69.
4. Биметаллический прокат / П.Ф. Засуха, В.Д. Коршиков, О.Б. Бухвалов, А.А. Ершов. – М.: Metallurgiya, 1970. – 264 с.
5. Технология слоистых металлов / А.Г. Кобелев, И.Н. Потапов, Е.В. Кузнецов. – М.: Metallurgiya, 1991. – 248 с.
6. Аркулис Г.Э. Совместная пластическая деформация разных металлов. – М.: Metallurgiya, 1964. – 350 с.
7. Теория пластичности / Г.Э. Аркулис, В.Г. Дорогобид. – М.: Metallurgiya, 1987. – 352 с.
8. Mathematical model of bimetallic sheet rolling / Duya H., Hietrzyk M. // Metallurgia i odlewnictwo. – 1992. – Tom 8. – Zeszyt 2. – S. 43–52.
9. Numerical modelling of cold-roll bonding of clad metal sheets / Luo Chunhui, Pend Dashu, Xu Zuohui // J. Cent. S. Univ. Technol. – 1997. – № 2. – PP. 125–127.
10. Опыт расчета прокатки биметаллических листов / М.И. Бояршинов, Г.Э. Аркулис, Г.А. Бричко // Инженерные методы расчета технологических процессов обработки металлов давлением. – Свердловск: Metallurgizdat, Свердлов. отд-ние, 1963. – С. 303–307.

11. Биметаллы / Л.Н. Дмитриев, Е.В. Кузнецов, А.Г. Кобелев и др. – Пермь: Пермское книжное изд., 1991. – 416 с.
12. Анализ совместной пластической деформации разнородных металлов / М.И. Бояршинов, Г.Э.

Аркулис // Инженерные методы расчета технологических процессов обработки металлов давлением: межвузовская научно-техническая конференция: докл. конф. – Свердловск: Metallurgizdat, Свердлов. отд-ние, 1963. – С. 295–298.

MODELLING OF INITIAL THICKNESSES OF LAYERS AT ROLLING OF BIMETALLIC PACKAGES ON TERMS OF JOINT PLASTIC DEFORMATION

V. Zagoryansky

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: zagor_vlad@ukr.net

In the process of rolling of bimetallic packages consisting of three layers (in this case soft-hard-soft) there is a task of finding of initial thicknesses of layers (required thicknesses of layers are known). The decision of the task is based on the well-known theses of theory of joint plastic deformation of different metals. The thickness of soft layer in a bimetallic package depends on proportion of thicknesses of layers in a package after rolling, external and interlaminar friction and mechanical properties of metals of layers. Joint deformation will take place, when resistance to joint deformation will become less resistance of partial deformation. The thickness of the initial package is found from the condition of the beginning of the joint deformation. In the article the optimization model is created, which is implemented in Microsoft Excel. The initial thickness of the bimetal package is found by using Solver add-in.

Key words: optimization model, rolling, bimetal package, thickness of layers, joint deformation.

REFERENCES

1. Tarnovskiy I.Ya, Pozdeev A.A., Ganago O.A. and others (1963) *Teoriya obrabotki metallov davleniem (variatsionnye metody rascheta usily i deformatsiy* [Theory of treatment of metals by pressure (Variational methods of calculation of strengths and deformations)], Metallurgizdat, Moscow, USSR.
2. Dorogobyd V.G. and Il'yna N.N. (1998) *Teoriya prokatki sloistyh metallov* [Theory of rolling of layered metals], MGTU, Magnitogorsk, Russia.
3. Zagoryansky V.G., Zagoryansky O.V. (2013), "Modelling of layer thicknesses after rolling symmetric bimetallic packets based on the energy approach", *Nauchnyj Vestnik Donbasskoy gosudarstvennoy mashinostroyitel'noy akademii*, vol. 2 (12E), pp. 63–69.
4. Zasuha P.F., Korshchikov V.D., Buhvalov O.B., Ershov A.A. (1970) *Bimetallicheskiy prokat* [Bimetallic rolled metal], Metallurgiya, Moscow, USSR.
5. Koblelev A.G., Potapov I.N., Kuznetsov E.V. (1991) *Technologiya sloistyh metallov* [Technology of layered metals], Metallurgiya, Moscow, USSR.
6. Arkulis G.E. (1964) *Sovmestnaya plasticheskaya*

deformatsiya raznyh metallov [Joint plastic deformation of different metals], Metallurgiya, Moscow, USSR.

7. Arkulis G.E. and Dorogobyd V.G. (1987) *Teoriya plastichnosti* [Theory of plasticity], Metallurgiya, Moscow, USSR.

8. Dyja H., Hietrzyk M. (1992) "Mathematical model of bimetallic sheet rolling", *Metallurgia i odlewnictwo*, Tom 8. – Zeszyt 2. – S. 43–52.

9. Luo Chunhui, Pend Dashu, Xu Zuohui (1997), "Numerical modelling of cold-roll bonding of clad metal sheets", *J. Cent. S. Univ. Technol.*, № 2, pp. 125–127.

10. Boyarshinov M.I., Arkulis G.E., Brichko G.A. (1963) "The experience of the calculation rolled bimetal plates", *Inzhenernye metody rascheta technilogicheskikh protsessov obrabotki metallov davleniem*, pp. 303–307.

11. Dmitrov L.N., Kuznetsov E.V., Koblelev A.F. and others (1991) *Bimetally* [Bimetals], Permskoe knizhnoe izdatelstvo, Perm, USSR.

12. Boyarshinov M.I., Arkulis G.E. (1963) "The analysis of the joint plastic deformation of different metals", *Inzhenernye metody rascheta technilogicheskikh protsessov obrabotki metallov davleniem*, pp. 295–298.

Стаття надійшла 18.05.2014.