

УДК 621.771:62.419-5

В. Г. ЗАГОРЯНСКИЙ, Л. Э. ДИКАЯ**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ И СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПАКЕТОВ «МЕДЬ-АЛЮМИНИЙ-МЕДЬ»**

В статье проведено сравнение полученных экспериментально толщин слоев после прокатки трехслойных пакетов «медь-алюминий-медь» и рассчитанных по предложенной ранее методике, включающей оптимизационную модель, основанную на энергетическом подходе. Сравнение показало, что полученные результаты практически совпадают, что подтверждает адекватность методики расчета. Экспериментально установлено, что уменьшение толщины слоя меди в исходном пакете приводит к снижению его деформации. Получены графики зависимостей среднего контактного давления на валки от соотношения толщин слоев в пакете. Снижение толщины слоя меди в исходном пакете приводит к уменьшению среднего контактного давления.

Ключевые слова: холодная прокатка, трехслойный пакет, деформации слоев, оптимизационная модель, среднее контактное давление.

В статті проведено порівняння отриманих експериментально товщин шарів після прокатування тришарових пакетів «мідь-алюміній-мідь» та розрахованих за запропонованою раніше методикою, яка включає оптимізаційну модель, яка ґрунтується на енергетичному підході. Порівняння показало, що отримані результати практично співпадають, що підтверджує адекватність методики розрахунку. Експериментально встановлено, що зменшення товщини шару міді у вихідному пакеті призводить до зниження його деформації. Отримані графіки залежностей середнього контактного тиску на валки від співвідношення товщин шарів в пакеті. Зниження товщини шару міді у вихідному пакеті призводить до зменшення середнього контактного тиску.

Ключові слова: холодне прокатування, тришаровий пакет, деформації шарів, оптимізаційна модель, середній контактний тиск.

In the paper is compared the thickness of layers obtained experimentally after rolling of three-layered package «copper-aluminum-copper» and ones calculated in previously proposed method, that includes an optimization model based on the energy method. The comparison showed that the results are almost the same, which confirms the adequacy of the calculation method. It was established experimentally that the reduction in the thickness of the copper layer in the initial sandwich reduces its deformation. The obtained graphs of dependences of the average contact pressure on the rolls on the ratio of the thicknesses of the layers in the sandwich (it was rolled as a two-layered packets, and three-layered sandwiches with cladding layers of a copper) show that this dependence is close to linear. It is established that the average contact pressure over the whole range of ratios of thicknesses of the layers in the sandwich from the side of the aluminum is higher than that of the copper. Reducing the thickness of the layer of copper in the original sandwich results in the reduction of the average contact pressure.

Keywords: cold rolling, three-layered package, deformations of layers, optimization model, average contact pressure.

Введение. При технологической подготовке производства биметаллов прокаткой одной из важнейших задач, позволяющей избежать затратных экспериментальных решений, является обоснование, на основе теории пластической деформации биметаллов, предварительной гипотезы о получаемых толщинах слоев в готовом биметалле, определяемых эксплуатационными требованиями к нему.

При получении биметалла прокаткой основная доля неравномерности деформации ложится на первый проход, обеспечивающий надежное схватывание слоев. При получении прокаткой биметаллов из цветных металлов и сплавов, в частности, композиции алюминий-медь, при значительных относительных деформациях обеспечивается надежное плакирование в первом проходе [1].

Анализ последних исследований и литературы.

Общие энергетические теоремы теории упруго-пластических деформаций предложены Л. М. Качановым [2] и им же, на основе этой теории, разработаны приближенные вариационные методы решения упруго-пластических задач.

В соответствии с ними, принцип минимума полной мощности деформируемого тела (принцип возможных изменений деформированного состояния) рассматривает мощность этого тела как функционал произвольной системы скоростей, которая удовлетворяет кинематическим граничным условиям; функционал принимает минимальное значение для системы скоростей, фактически реализуемой в деформируемом теле.

Теоретическое решение задачи несимметричной прокатки полос в валках одинакового диаметра (типичный случай прокатки биметаллических пакетов) с использованием энергетического метода приведено, в частности, в работе [3].

В работе [4] представлена оптимизационная модель (и ее программная реализация), основанная на известной методике расчета толщин слоев биметалла после прокатки по энергетическому методу с применением минимума мощности внешних сил.

Основой для оптимизационной модели послужили аппарат теории совместной пластической деформации разных металлов, разработанный исследователями Магнитогорского политехнического института [5], а также модели прокатки, предложенные в работах иностранных исследователей [6,7]. Отметим, что результаты расчетов по оптимизационной модели [4] требуют экспериментального подтверждения.

Также важным попутно решаемым в ходе экспериментов вопросом является установление закономерностей влияния соотношения толщин слоев в исходном пакете на среднее контактное давление пакета на валки, определяющее силовые характеристики процесса. Таким образом, экспериментальное исследование влияния соотношения толщин слоев в исходном пакете (случай трехслойного пакета) на деформационные и силовые параметры процесса его холодной прокатки позволит оптимизировать параметры процесса.

Цель работы – для трехслойных пакетов медь-алюминий-медь определенной толщины, варьируя

соотношением толщин слоев, экспериментально получить закономерности деформации слоев, проверяя таким образом полученные ранее методики расчета толщин слоев, и для этих пакетов (а также и двухслойных) определить закономерности изменения среднего контактного давления при прокатке.

Материалы исследований. Исследование проводили на трехслойных пакетах по схеме Т-М-Т (твердый-мягкий-твердый слой) (а также двухслойных пакетах), собранных из листов меди М1 и алюминия АД0, отожженных, промытых химически чистым ацетоном, зачищенных кардной щеткой и склепанных на переднем конце образцов.

Прокатка пакетов по схеме Т-М-Т представляет больший интерес, чем по схеме М-Т-М, так как в работе [8] указывается, что схема Т-М-Т приводит к большей, по сравнению с пакетами М-Т-М, неравномерности деформаций слоев в готовом биметалле, что определяется возникающим в твердых слоях разноименным напряженным состоянием. При прокатке по схеме М-Т-М во внутреннем твердом слое возникают растягивающие напряжения, а в мягких слоях в приконтактных поверхностях с валком и твердым слоем возникают дополнительные сжимающие напряжения. Такое уравнивание обеспечивает минимальную неравномерность деформаций.

Пакеты собирались из листов алюминия (межгосударственный стандарт ГОСТ 21631-76. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия) марки АД0 (химический состав – по межгосударственному стандарту ГОСТ 4784-97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки) и листов меди (межгосударственный стандарт ГОСТ 495-92. Листы и полосы медные. Технические условия) марки М1 (химический состав – по межгосударственному стандарту ГОСТ 859-2001. Медь. Марки).

Использовавшиеся варианты сочетаний толщин слоев в пакетах приведены в табл. 1. Соотношение толщин слоев составляло 0,15...6,5.

Приняты следующие условные обозначения: первая цифра в обозначениях толщин: 0 – начальная толщина, 1 – конечная толщина; вторая цифра в обозначениях толщин: 1 – средний слой, 2 – наружные слои. Тогда h_{01} и h_{02} – начальные толщины слоев, соответственно среднего и наружных, h_1 – конечная толщина пакета после прокатки; h_{11} и h_{12} – толщины среднего и наружных слоев в пакете после прокатки.

Таблица 1 – Деформации слоев после прокатки трехслойных пакетов алюминий-медь

Алюминий	h_{01} , мм	2	5	7,5	12	13
			55	55	52	49
	h_{11} , мм	0,9	2,25	3,6	6,12	6,63
Медь	h_{02} , мм	13	10	7,5	3	2
	ε_{\square} , %	42	38	32	17	15
	h_{12} , мм	7,54	6,2	5,1	2,49	1,7
Пакет	h_{01}/h_{02}	0,154	0,5	1	4	6,5
	h_1 , мм	8,44	8,45	8,7	8,61	8,33
		ε_{Σ}	0	4	0	0

Для холодной прокатки пакетов использовался лабораторный стан дуо со шлифованными валками диаметром 180 мм. В бочках валков были установлены вкладыши с точечными месдозами для замера удельного давления (площадь штифтов приблизительно 1 мм²).

Относительная деформация пакетов в первом проходе (достаточном для прочного соединения слоев [1]) составляла 42...44%.

После холодной прокатки пакеты разрезали для замера толщин слоев в продольном осевом сечении.

Результаты исследований деформаций слоев трехслойных пакетов медь-алюминий-медь суммарной толщиной 15 мм представлены в табл. 1.

Отметим, что уменьшение толщины меди в исходном пакете приводит к снижению деформации слоя меди.

Диаграммы наклепа при холодной прокатке биметаллических пакетов из алюминия А000 и электролитической меди (сочетание металлов слоев, близкое к исследуемому в данной работе) приведены в [9] (рис. 1).

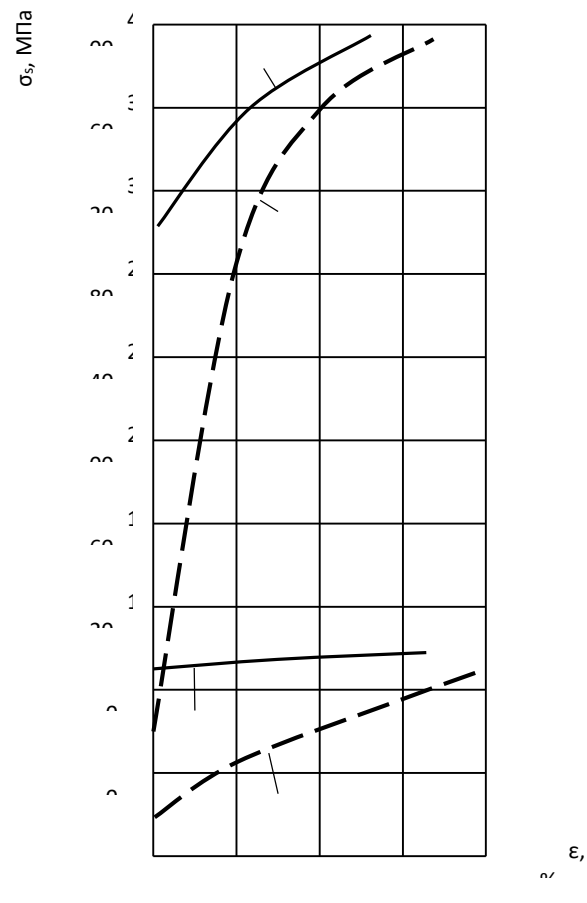


Рис. 1 – Повышение сопротивления деформации слоев листового биметалла при холодной прокатке [9]:
1 – отожженный алюминий; 2 – нагартованный алюминий;
3 – отожженная медь; 4 – нагартованная медь

В соответствии с диаграммой наклепа, приведенной на рис. 1, при относительном обжатии $\varepsilon = 45\%$ для отожженного алюминия предел текучести σ_s

составляет 60...65 МПа, для отожженной меди – 370 МПа. Таким образом, сопротивление деформации твердого слоя (медь) превышает сопротивление мягкого (алюминий) примерно в 5,5 раз.

Рассмотрим особенности программы, используемой при моделировании и оптимизации данной задачи [4], и применяемого в ней итерационного алгоритма.

Для решения задач оптимизации в табличном процессоре Microsoft Excel используется надстройка (программа) Поиск решения (в оригинале – Solver). Транснациональная компания Frontline System, США, разработчик программы Solver, уже давно специализируется на разработке мощных и удобных способов оптимизации, встроенных в среду популярных табличных процессоров разнообразных фирм-производителей (Solver для MS Excel, Adobe для Quattro Pro и др.).

Высокая эффективность их применения объясняется интеграцией программы оптимизации и табличного бизнес-документа. Программа Solver, встроенная в среду табличного процессора MS Excel, в связи с его мировой популярностью, является наиболее распространенным инструментом для поиска оптимальных решений в сфере бизнеса.

Надстройка Поиск решения, используемая с 1991 года, предназначена для решения определенных систем уравнений, линейных и нелинейных задач оптимизации. Поиск решений является частью блока задач, который иногда называют анализ "что-если" (изменение значений ячеек и анализ влияния этих изменений на результаты вычисления формул на рабочем листе, в которые входят ссылки на эти ячейки). Поиск решения позволяет [10]: получить несколько решений задач, если решение многовариантно; работать одновременно с несколькими изменяемыми ячейками; налагать ограничения на значения изменяемых ячеек.

Процедура поиска решения работает с группой ячеек, которые входят в виде ссылок в функцию в целевой ячейке и изменяет значения в этих ячейках до тех пор, пока не будет найдено оптимальное значение функции, содержащейся в целевой ячейке. Для этой процедуры задаются также ограничения, представляющие собой уравнения или неравенства, для решения системы которых применимы итерационные численные методы (в надстройке Поиск решения можно выбрать опцию Метод поиска, позволяющую выбрать алгоритм оптимизации (метод Ньютона или метод сопряженных градиентов). Во втором методе используется меньше памяти, но выполняется больше итераций, чем в первом.

Для расчета заданного значения применяются различные математические методы поиска.

Исходные данные	Переменные	Мощности, Вт·м	Ограничения
h_{01} , мм	h_{11} , мм	N_1	8,550001
h_{02} , мм	h_{12} , мм	N_2	0,0042
h_0 , мм		N_F	0,0081
ϵ		N_p	0,0657
h_1 , мм		N_{C1}	0,0045
Δh_1 , мм		N_{C2}	0,0012
Δh_2 , мм			
Δh_2 , мм	0,231699	Целевая функция (суммарная мощность, Вт·м)	0,2718
D, мм	180		
f	0,3		
p	0,3		
h_2 , мм	24,05627		
β	0,128532		
$\sec^2 \beta$	1,016704		

Рис. 2 – Результаты выполнения оптимизации примера по методике [4] на рабочем листе Microsoft Excel

Надстройка Поиск решения использует алгоритм нелинейной оптимизации Generalized Reduced Gradient (GRG2), разработанный Л. Ласдоном (Техасский университет, г. Остин) и А. Уореном (государственный университет, г. Кливленд, Огайо) [11]. Алгоритмы симплексного метода и метода «branch-and-bound» для решения линейных и целочисленных задач с ограничениями разработаны Джоном Уотсоном (John Watson) и Деном Филстра (Dan Fylstra) из Frontline Systems, Inc.

Результат выполнения оптимизации примера данной задачи приведен на рис. 2 (экранная копия рабочего листа Microsoft Excel).

Для случая прокатки пакета медь-алюминий-медь с исходной толщиной пластин меди (общей) 2 мм и алюминия 13 мм, расчет по оптимизационной модели дает толщины слоев: алюминия – 6,78 мм, меди – 1,77 мм (рис. 2). Результаты эксперимента по прокатке данного пакета (табл. 1): толщина слоя алюминия – 6,63 мм, меди – 1,7 мм.

Таким образом, применимость на практике программной реализации оптимизационной модели расчета толщин слоев на основе энергетического подхода [4] подтверждается экспериментально с большой точностью.

На рис. 3 показаны зависимости среднего контактного давления на валки от соотношения толщин слоев в пакете (прокатывались как трехслойные пакеты с медным плакирующим слоем, так и двухслойные пакеты).

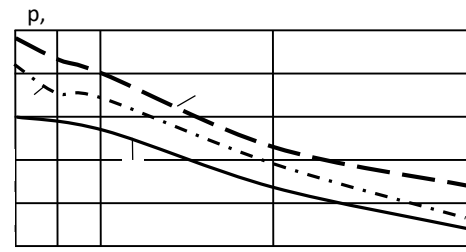


Рис. 3 – Среднее контактное давление на валки:
1 – со стороны алюминия (двухслойный пакет),
2 – со стороны меди (двухслойный пакет),
3 – со стороны меди (трехслойный пакет)

Обращает внимание тот факт, что во всем диапазоне отношений толщин слоев в пакете среднее контактное давление со стороны алюминия выше, чем со стороны меди. Уменьшение толщины слоя меди в исходном пакете приводит к снижению среднего контактного давления.

Выводы. Полученные экспериментальной прокаткой трехслойных пакетов медь-алюминий-медь толщины слоев соответствуют рассчитанным по методике, основанной на энергетическом подходе. Уменьшение толщины медного слоя в исходном пакете приводит к снижению его деформации. Полученные графики зависимостей среднего удельного давления на валки от соотношения толщин слоев в пакете (двухслойные пакеты и трехслойные пакеты с плакирующим слоем меди) показывают, что эти зависимости близки к линейным. Среднее контактное давление во всем диапазоне отношений толщин слоев в пакете со стороны алюминия выше, чем со стороны меди. Уменьшение толщины слоя меди в пакете приводит к снижению среднего контактного давления.

Список литературы

1. Экспериментальное исследование механики прокатки биметалла / П. И. Полухин, А. В. Архангельский, Ю. В. Кнышев, В. А. Мастеров // Известия вузов. Черная металлургия. – 1965. – № 8. – С. 73–79.
2. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
3. Синицын В. Г. Теоретическое исследование процесса несимметричной прокатки / В. Г. Синицын, И. А. Андрющенко, // Известия вузов. Черная металлургия. – 1973. – № 1. – С. 69–72.
4. Загорянский В. Г. 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.
5. Дорогобид В. Г. Теория прокатки слоистых металлов / В. Г. Дорогобид, Н. Н. Ильина. – Магнитогорск: МГТУ, 1998. – 81 с.
6. Mathematical model of bimetallic sheet rolling / Dyja H., Hietrzyk M. // *Metallurgia i odlewnictwo*. – 1992. – Tom 8. – Zeszyt 2. – s. 43–52.
7. 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.

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Исследование деформаций и силовых параметров при холодной прокатке трехслойных пакетов «медь-алюминий-медь» / В. Г. Загорянский, Л. Э. Дикая // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 37–41. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2519-2671

Дослідження деформацій і силових параметрів при холодному прокатуванні тришарових пакетів «мідь-алюміній-мідь» / В. Г. Загоряньський, Л. Е. Дика // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 37–41. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2519-2671

Investigation of deformations and force parameters at cold rolling three-layer packets «copper-aluminum-copper» / V. G. Zagoryanskii, L. E. Dikaya // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 30 (1202). – P. 37–41. – Bibliogr.: 11 – ISSN 2519-2671

8. Кобелев А. Г. Технология слоистых металлов / А. Г. Кобелев, И. Н. Потопов, Е. В. Кузнецов. – М.: Металлургия, 1991. – 248 с.
9. Некоторые особенности прокатки слоистой полосы / П. И. Полухин, А. В. Архангельский, Ю. В. Кнышев, В. А. Мастеров // Известия вузов. Черная металлургия. – 1965. – № 10. – С. 80–83.
10. Шитов В. Н. Excel. Единый справочник / В. Н. Шитов. – М.: ГроссМедиа, 2005. – 512 с.
11. Постановка задачи и решение проблемы с помощью процедуры поиска решения. – Режим доступа : <http://office.microsoft.com/ru-ru/excel-help/HP010072691.aspx>. – Дата обращения : 20 октября 2016.

References (transliterated)

1. Poluhin P. I., et al. *Ekspерimental'noe issledovanie mehaniki prokatki bimetallo* [Experimental investigation of mechanics of rolling of bimetal]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1965, No 8, pp. 73–79.
2. Malinin N. N. *Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti* [Applied theory of plasticity and creep]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 400 p.
3. Sinitsin V. G., et al. *Teoreticheskoe issledovanie protsessy nesimmetrichnoj prokatki*. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 1973, No 1, pp. 69–72.
4. Zagorjanskij V. G. and Zagorjanskij O. V. *Modelirovanie tolshchin sloev posle prokatki simmetrichnyh bimetallicheskih paketov na osnove energeticheskogo podhoda*. *Nauchnyj vestnik Donbasskoj gosudarstvennoj mashinostroitel'noj akademii*. 2013, No 2(12E), pp. 63–69.
5. Dorogobid V. G. and Il'ina N. N. *Teoriya prokatki sloistyh metallov* [Theory of rolling of layered metals]. Magnitogorsk, MGTU, 1998. 81 p.
6. Dyja H. and Hietrzyk M. *Mathematical model of bimetallic sheet rolling*. *Metallurgia i odlewnictwo*, 1992, No 8, pp. 43–52.
7. Luo Chunhui, Pend Dashu and Xu Zuohui. *Numerical modelling of cold-roll bonding of clad metal sheets*. *J. Cent. S. Univ. Technol*, 1997, No 2, pp. 125–127.
8. Koblelev A. G., Potapov I. N. and Kuznetsov E. V. *Tehnologiya sloistyh metallov* [Technology of layered metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1991. 248 p.
9. Poluhin P. I., et al. *Nekotorye osobennosti prokatki sloistoj polosy* [Some features of rolling of layered stripe]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1965, No 10, pp. 80–83.
10. Shitov V. N. *Excel. Edinyj spravochnik* [Excel. Unified reference book]. Moscow, GrossMedia Publ., 2005. 512 p.
11. *Postanovka zadachi i reshenie problem s pomosh'yu protsedury poiska resheniya* [Statement of the problem and the solution to the problem by using the search procedures solutions]. Available at: <http://office.microsoft.com/ru-ru/excel-help/HP010072691.aspx>. (accessed 20.09.2016)

Поступила (received) 05.11.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Загорянський Володимир Георгійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, тел.: (050) 874-87-48; e-mail: zagor_vlad@ukr.net.

Загорянский Владимир Георгиевич – кандидат технических наук, доцент кафедры транспортных технологий Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, тел.: (050) 874-87-48; e-mail: zagor_vlad@ukr.net.

Zagoryanskiy Vladimir Georgievich – candidate of technical sciences, associated professor of department of transportation technology of Mykhailo Ostrohradskiy Kremenchuk National University, tel.: (050) 874-87-48; e-mail: zagor_vlad@ukr.net.

Дикая Луиза Эхматовна – ассистент кафедры технологии машиностроения Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, тел.: (096) 254-20-90; e-mail: lu.di@mail.ru.

Дика Луїза Ехматівна – ассистент кафедр технології машинобудування Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, тел.: (096) 254-20-90; e-mail: lu.di@mail.ru.

Dikaya Luiza Ehmatorvna – assistant of department of technology of machine-building of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, tel.: (096) 254-20-90; e-mail: lu.di@mail.ru.