

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.771.01: 621.771.23: 621.777.8

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-1>

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ПРОКАТКОЮ ВІДНОСНО ТОВСТИХ ДВОШАРОВИХ БІМЕТАЛЕВИХ ЛИСТОВИХ ЗАГОТІВОК З МЕХАНІЧНИМ З'ЄДНАННЯМ

Міхєєнко Денис Юрійович,

кандидат технічних наук,

доцент кафедри природничо-наукових та загальноінженерних дисциплін

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0003-1966-0618

Грудкіна Наталія Сергіївна,

доктор технічних наук,

професор кафедри природничо-наукових та загальноінженерних дисциплін

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-0914-8875

Стаття присвячена розширенню сортаменту, підвищенню якості і зниженню собівартості під час виробництва біметалевих відносно товстих двошарових композицій на основі розвитку методів розрахунку в прокатці біметалевих листів з механічним з'єднанням складників. Засновуючись на чисельному рекурентному рішенні кінцево-різницевої форми умови статичної рівноваги, розроблено математичну модель напружено-деформованого стану металу, що виникає під час виробництва біметалевих листів за допомогою прокатки м'якого матеріалу на твердій підкладці з поздовжніми пазами. Цей метод дає змогу досліджувати та прогнозувати напружено-деформований стан металу під час процесу прокатки, коли м'який матеріал прокатується на твердій підкладці з поздовжніми пазами. Врахування чисельного рекурентного рішення кінцево-різницевої форми умови статичної рівноваги дає можливість точно моделювати різні аспекти цього процесу, такі як розподіл напруг та деформацій у матеріалі. Проведено двовимірний аналіз напружено-деформованого стану металу складової частини, що плакує, використовуючи метод полів ліній ковзання. Цей метод дає змогу повністю врахувати неоднорідність розподілу напруг та деформацій по висоті кожного окремого перерізу зони пластичного формозміни металу. Отримані результати аналізу збіглися з результатами чисельного кінцевого математичного моделювання. Розроблено математичну модель, реалізовану в пакеті кінцево-елементного моделювання Abaqus Student Edition, для оцінки достовірності отриманих теоретичних рішень. Порівняння цих даних з результатами чисельного моделювання та методу полів ліній ковзання показало достатню збіжність, що вказує на можливість використання одновимірної математичної моделі в системі автоматизованого проектування технологічних режимів та обладнання. Застосування варіаційного підходу у розрахунку напружено-деформованого стану металу під час прокатки біметалевих композицій дає змогу врахувати поздовжню течію металу. Ця модель дає можливість прогнозувати глибину затікання металу м'якої складової частини в поздовжні пази твердої підкладки і, таким чином, надати практичні рекомендації щодо вибору розмірів заготівлі шару, що плакує.

Ключові слова: відносно товсті біметалеві листи, механічне з'єднання складових частин, напружено-деформований стан, математичне моделювання.

Mikheienko Denys, Hrudkina Natalia. Theoretical studies of the rolled manufacturing process of thick two-layer bimetallic sheet bills with mechanical connection

The article is devoted to the expansion of the assortment, improvement of quality and reduction of cost in the production of bimetallic relatively thick two-layer compositions based on the development of calculation methods and rolling of bimetallic sheets with mechanical connection of components. Based on the numerical recurrent solution of the finite-difference form of the condition of static equilibrium, a mathematical model – the deformed state of the metal, which occurs during the production of bimetallic sheets by rolling soft material on a hard substrate with longitudinal grooves. This method allows you to study and predict the stress-strain state

of the metal during the rolling process, when the soft material is rolled on a hard substrate with longitudinal grooves. Taking into account the numerical recurrent solution of the finite-difference form of the condition of static equilibrium allows you to accurately model various aspects of this process, such as the distribution of stresses and strains in the material. A two-dimensional analysis of the stress-strain state of the metal of the weeping component was carried out using the slip line field method. This method allows you to fully take into account the inhomogeneity of the distribution of stresses and strains along the height of each individual section of the zone of plastic deformation of the metal. The obtained results of the analysis coincided with the results of numerical finite mathematical modeling. A mathematical model implemented in the Abaqus Student Edition finite element modeling package was developed to assess the reliability of the obtained theoretical solutions. A comparison of these data with the results of numerical modeling and the method of slip line fields showed sufficient convergence, which indicates the possibility of using a one-dimensional mathematical model in the system of automated design of technological modes and equipment. The use of the variational approach in the calculation of the stress-strain state of the metal during rolling of bimetallic compositions allows taking into account the longitudinal flow of the metal. This model makes it possible to predict the depth of penetration of the metal of the soft component into the longitudinal grooves of the hard substrate and, thus, to provide practical recommendations for choosing the dimensions of the workpiece of the cladding layer.

Key words: relatively thick bimetal sheets, mechanical link of the components, stress-strain state, mathematical simulation.

Підвищення техніко-економічних показників металургійного і заготовчого комплексів України у контексті їх інтеграції у світове промислове виробництво є ключовим завданням для забезпечення конкурентоспроможності та стабільності галузі. Розширення сортаменту продукції і зниження собівартості, зокрема через освоєння виробництва біметалевих листів з механічними з'єднаннями, відображає потребу в постійному технологічному розвитку.

Процеси прокатки є одними з найбільш перспективних технологій для досягнення цієї мети. Вони можуть забезпечити високу якість та точність виготовлення продукції, що є важливим в умовах конкурентного ринку. Однак необхідно провести широкий спектр досліджень для підвищення наукової обґрунтованості та ефективності технічних рішень. Це допоможе оптимізувати процеси виробництва, знизити витрати та підвищити якість продукції.

Нині з'явилася потреба у відносно товстому біметалевому листі з поєднаннями матеріалів «мідь + сталь», «титан + сталь», «зносостійка сталь + конструкційна сталь», «корозійностійка сталь + конструкційна сталь», «бронза + сталь» тощо. Ці типорозміри необхідні для виробництва кристалізаторів машин безперервного лиття заготовок, захисних планок станів прокатних станів, підшипників ковзання тощо. Водночас традиційні способи виробництва відносно товстих біметалічних листів мають цілу низку недоліків, тому за основу нової технології було взято виробництво двошарової біметалічної композиції з утворенням механічних зв'язків між складовими [1, с. 1]. В одній із складових біметалічної композиції, яка в процесі прокатки пластично не деформується і називається твердою, виконані поздовжні пази різної форми. В результаті спільної прокатки

(рис. 1) відбувається затікання м'якої складової в поздовжні пази твердої підкладки і утворюється надійне механічне з'єднання складових, що забезпечує необхідну міцність на відрив за рахунок сил зовнішнього тертя на бокових контактних поверхнях пазів або за рахунок рознесеного хвоста «ластівки».

Водночас недостатнє вивчення цієї технології разом з відсутністю досвіду її промислового освоєння робить актуальним проведення відповідних теоретичних та експериментальних досліджень, спрямованих на уточнення вихідних передумов, розроблення методів розрахунку та конкретних практичних рекомендацій.

Крім відносної простоти виробництва, до переваг технології (рис. 1) слід віднести можливість з'єднання складових з різних матеріалів, а також можливість використання традиційного обладнання станів полистової прокатки.

Механіка процесу з'єднання двох листів за рахунок затікання матеріалу, що плакує, в попередньо виконані пази, що плакується, дуже складна, оскільки важко вибрати оптимальний метод за поєднанням точності та трудомісткості. Інакше досягнення похибки, скажімо, в 2% проти 5–7% до цього може обійтися збільшенням трудомісткості вдвічі. Тому математична модель будується з урахуванням реальності виконання й практичного застосування та можливості розрахунку з використанням ЕОМ.

Враховуючи складний характер перебігу металу у зоні пластичного формозміни, вирішуємо завдання з використанням чотирьох теоретичних методів, причому вони взаємно доповнюють один одного.

Перший – метод чисельного рекурентного вирішення кінцево-різницевої форми умови статичної рівноваги виділеного елементарного обсягу зони пластичного формозміни

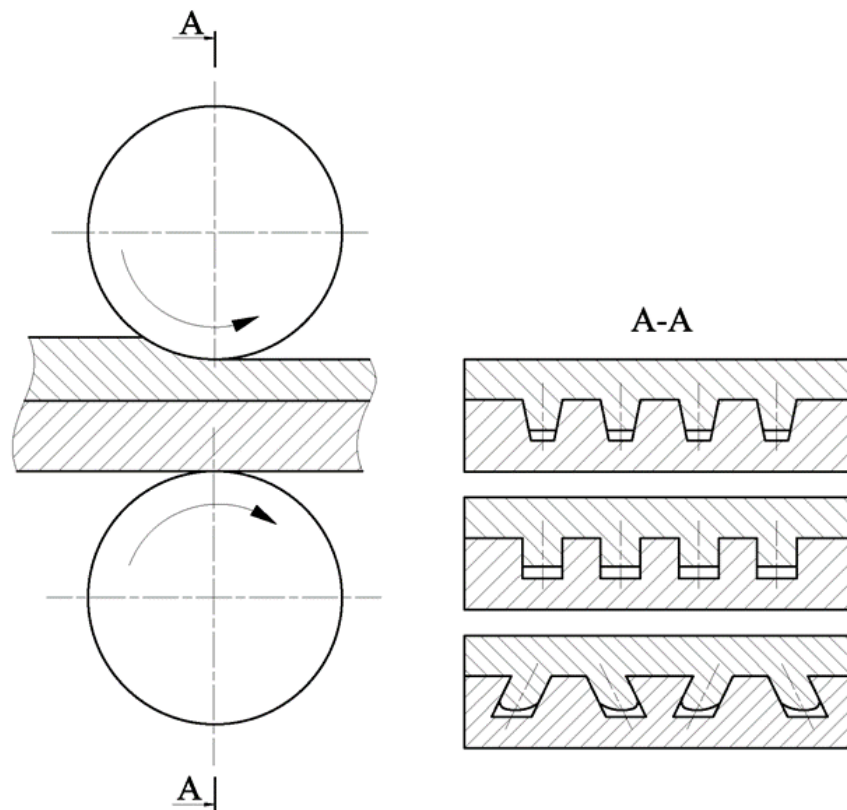


Рис. 1. Технологічна схема отримання прокаткою біметалічної листової композиції з механічним зв'язком

металу – дає змогу врахувати реальний характер розподілу геометричних характеристик, механічних властивостей та умов контактної тертя по довжині зони пластичної формозміни металу [2, с. 42].

Другий – метод полів ліній ковзання – дає змогу врахувати двовимірний характер пластичної формозміни металу, що наявний за його перетікання з плоскої зони, де на метал впливає прокатний валок, в клинову порожнину, виконану на листі, що плакується [3, с. 18].

Третій – метод кінцевих елементів – дає змогу отримувати найточнішу картину деформованого металу під час утворення механічного зв'язку між складовими біметалічної композиції [3, с. 115].

Четвертий – варіаційний метод – дає змогу врахувати тривимірний характер пластичної формозміни металу під час утворення механічного зв'язку [4, с. 28].

Великі перспективи має спосіб виробництва прокаткою щодо товстих біметалічних листів з механічним зв'язком між складовими, в якому одна зі складових композиції пластично деформується і затікає в поздовжні похилі пази твердої підкладки. Однак розрахунок напружено-деформованого металу під час реалізації

технології є достатньо складним. Тому для розрахунку енергосилових параметрів було прийнято рішення про заміну форми паза на вертикальну клинову порожнину, що повторюється (рис. 2). Передбачається, що розрахункові значення напружень і зусиль у цьому разі несуттєво відрізняться від реальних.

За аналогією з традиційними схемами процесів гарячої і холодної прокатки в основу математичної моделі, що розробляється, було покладено чисельне рекурентне рішення кінцево-різницевої форми умови статичної рівноваги виділених елементарних обсягів металу в зоні його пластичної формозміни.

Загалом отримані аналітичні залежності разом з відомими рішеннями щодо визначення механічних властивостей різних металів та сплавів в умовах їх гарячого та холодного деформування склали повний алгоритм з автоматизованого розрахунку напружено-деформованого стану під час реалізації процесу виробництва двошарових біметалічних листів з механічним зв'язком шляхом прокатки складової, що плакує, на недеформованій підкладці з поздовжніми клиновими пазами.

Аналогічний двовимірний аналіз проведено на основі методу полів ліній ковзання, що дає

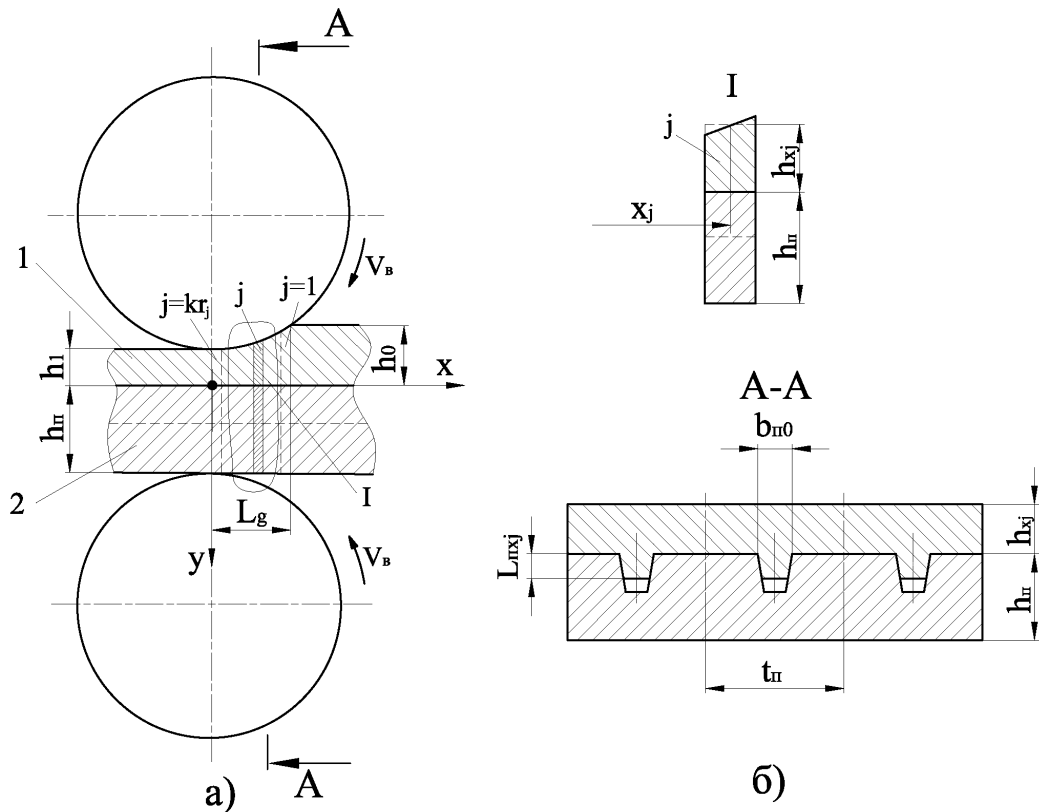


Рис. 2. Розрахункова схема процесу прокатки біметалічної композиції із затіканням металу відносно м'якої пластично деформованої складової 1 у відносно тонку клиноподібну порожнину недеформованої підкладки 2



Рис. 3. Результати кінцево-елементного моделювання затікання в поздовжні пази

змогу повною мірою врахувати неоднорідність розподілу та напруги деформації по висоті кожного окремого перерізу зони пластичного формозміни металу. При цьому якісно одержані результати повністю відповідали аналогічним результатам чисельного кінцево-різного математичного моделювання. Зокрема, було встановлено, що збільшення коефіцієнтів зовнішнього контактного тертя та кутів нахилу бічних поверхонь поздовжніх клинових пазів недеформованої підкладки однозначно приводить до підвищення рівнів енергосилових параметрів досліджуваної технологічної схеми процесу прокатки. Якісно значення сили прокатки на 10–15% нижче, ніж аналогічні результати, отримані для тих самих умов реалізації на основі чисельного кінцево-різницього

підходу. Зазначене свідчить про достатню відповідність отриманим теоретичним рішенням.

Задля ще однієї критеріальної оцінки ступеня достовірності отриманих з використанням кінцево-різницьових підходів теоретичних рішень було виконано кінцево-елементне математичне моделювання напружено-деформованого стану металу складової 1, що прокочується під час його затікання поздовжні пази пластично недеформованої підкладки 2. Безпосередні розрахунки шляхом кінцевих елементів проводилися з використанням програмного комплексу ABAQUS Student Edition (рис. 3).

Основним допущенням під час аналізу напружено-деформованого стану металу плакувальної складової на основі перерахованих методів є відсутність урахування поздовжньої

пластичної формозміни металу цієї складової, що впливає на вибір її початкової довжини, що визначає об'єм подальшого відрізання і, як наслідок, коефіцієнт виходу придатної металопродукції.

Цей фактор враховується на основі варіаційних підходів до чисельної рекурентної реалізації, заснованої на кінцево-різницевому аналізі потужностей всіх опорів деформації в рамках кожного виділеного елементарного об'єму металу в зоні його пластичної формозміни. Вибрана схема інтегрального осередку деформації показана на рис. 4.

Загалом отримані аналітичні залежності склали повний алгоритм автоматизованого прогнозування глибини затікання металу м'якої складової в поздовжні пази твердої підкладки в процесі прокатки відносно товстих біметалічних листів.

Доходимо таких висновків:

– на основі чисельних методів – чисельного рекурентного рішення кінцево-різницевої форми умови статичної рівноваги виділеного елементарного обсягу, а також методу полів ліній ковзання, методу кінцевих елементів – розроблено математичні моделі напружено-деформованого стану металу, що спостерігається під час виробництва біметалевих листів на основі прокатки м'якого матеріалу твердої підкладки з поздовжніми пазами;

– на основі варіаційного підходу сформульовано та вирішено завдання з обліку поздовжнього перебігу м'якої складової та прогнозування глибини затікання металу в паз у процесі прокатки;

– отримані математичні моделі можуть бути використані для розроблення алгоритмів та програмних засобів, за допомогою яких визначено значення енергосилових параметрів прокатки біметалічної композиції.

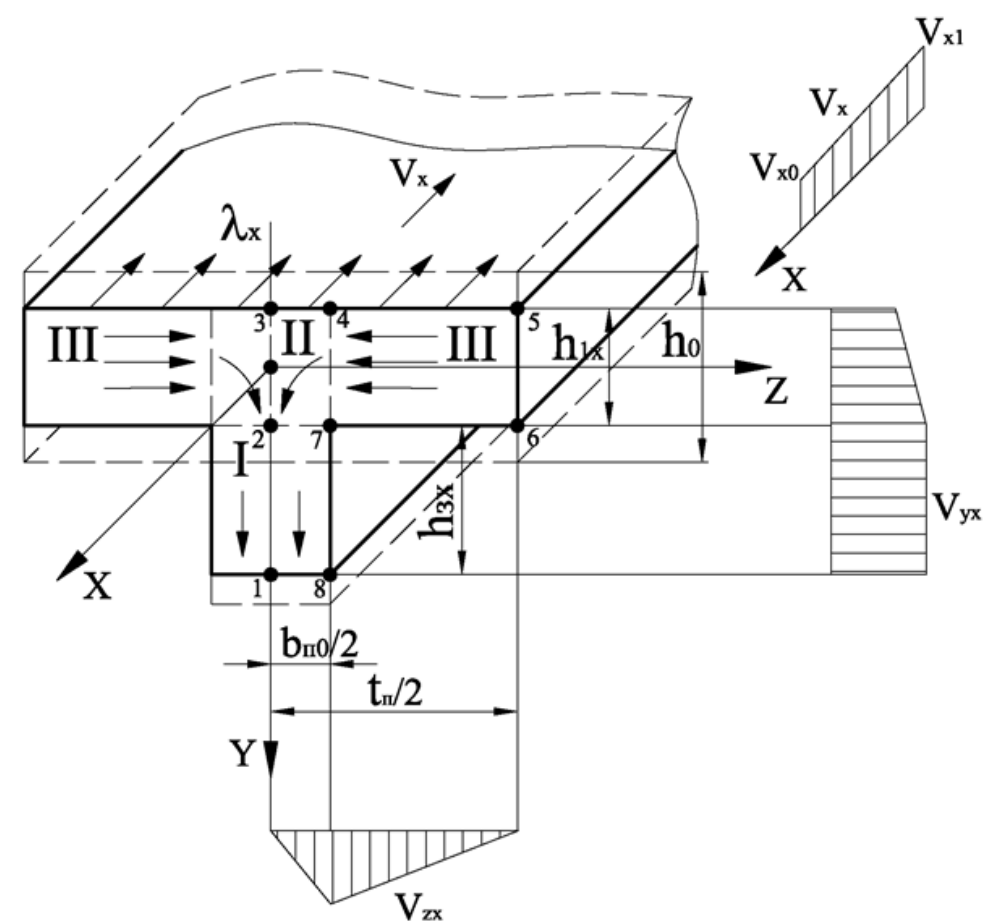


Рис. 4. Розрахункова схема поперечного перерізу осередку деформації під час прокатки біметалічної композиції затіканням металу відносно м'якої складової в щілинну порожнину підкладки, що не деформується

ЛІТЕРАТУРА:

1. Патент 21238 України МПК В 23 К 20/04. Спосіб виробництва двошарових біметалевих листових композицій / В.А. Федорінов, О.В. Сатонін, А.О. Сатонін, Д.Ю. Міхеєнко; Донбаська державна машинобудівна академія. № 2006 07687; заявл. 10.07.06; опубл. 15.03.07, Бюл. № 3. 8 с.
2. Кулік Т.О. Виробництво листового металопрокату з використанням режимів теплового деформування. *Перспективи розвитку, розширення сфери використання та вдосконалення технологій і обладнання*: монографія. Краматорськ: ДДМА, 2020. 128 с. ISBN 978-966-379-958-2.
3. Калюжний В.Л. Комп'ютерні методи моделювання процесів виготовлення конструкцій літальних апаратів: конспект лекцій. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 176 с.
4. Конспект лекцій з дисципліни «Методи аналізу, моделювання та оптимізації процесів ОМТ». Ч. 2: Методи моделювання для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності 136 «Металургія» за освітньо-науковою програмою «Обробка металів тиском» / укл. С.В. Єршов. Кам'янське: ДДТУ, 2016. 76 с.

REFERENCES:

1. Fedorinov V.A., Satonin O.V., Satonin A.O., Mikhieienko D.Yu. (2006). Patent 21238 Ukrainy MPK V 23 K 20/04. Sposib vyrobnytstva dvosharovykh bimetalovykh lystovykh kompozytsii [Patent 21238 of Ukraine IPC V 23 K 20/04. The method of production of two-layer bimetallic sheet compositions]. Donbaska derzhavna mashynobudivna akademiia. № 2006 07687; zaiavl. 10.07.06; opubl. 15.03.07, Biul. № 3. 8 s. [in Ukrainian]
2. Kulik, T.O. (2020). Vyrobnytstvo lystovoho metaloprokatu z vykorystanniam rezhymiv teploho deformuvannia. *Perspektyvy rozvytku, rozshyrennia sfery vykorystannia ta vdoskonalennia tekhnolohii i obladnannia: monohrafiia* [Production of rolled sheet metal using modes of warm deformation. Prospects for development, expansion of the scope of use and improvement of technologies and equipment]. Kramatorsk: DDMA. 128 s. ISBN 978-966-379-958-2. [in Ukrainian]
3. Kaliuzhnyi V.L. (2022). Kompiuterni metody modeliuвання protsesiv vyhotovlennia konstruktsii litalnykh aparativ: konspekt lektsii [Computer modeling methods of aircraft construction manufacturing processes]. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho. 176 s. [in Ukrainian]
4. Yershov S.V. (ukl.) (2016). Konspekt lektsii z dystsypliny "Metody analizu, modeliuвання ta optymizatsii protsesiv OMT". Ch. 2: Metody modeliuвання dlia zdobuvachiv vyshchoi osvity druhoho (mahisterskoho) rivnia zi spetsialnosti 136 "Metalurhiia" za osvitno-naukovoiu prohramoiu "Obrobka metaliv tyskom" [Synopsis of lectures on the discipline "Methods of analysis, modeling and optimization of OMT processes". Part 2: Modeling methods for students of higher education of the second (master's) level in the specialty 136 "Metallurgy" under the educational and scientific program "Processing of metals by pressure"]. Kamianske: DDTU. 76 s. [in Ukrainian]