

УДК: 669.14.018.29:620.18:621746.001.8
DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.241120.17.687

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ДЕФОРМАЦІЙНОГО ПРОРОБЛЕННЯ БЕЗПЕРЕРВНОЛИТИХ ЗАГОТОВОК НА МАКРО- І МІКРОСТРУКТУРУ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ (огляд)

БАБАЧЕНКО О. І.¹, *докт. техн. наук*,
ДЬОМІНА К. Г.², *канд. техн. наук*,
КОНОНЕНКО Г. А.³, *канд. техн. наук*,
ПОДОЛЬСЬКИЙ Р. В.^{4*}

¹ Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Акад. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Дніпро, Україна, тел.+38 (056) 790-05-14, e-mail: A_Babachenko@i.ua, ORCID: 0000-0002-2869-3478

² Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Акад. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Дніпро, Україна, тел.+38 (056) 790-05-14, e-mail: katya20@ua.fm, ORCID: 0000-0001-9668-8169

³ Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Акад. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Дніпро, Україна, тел.+38 (056) 790-05-14, e-mail: perlit@ua.fm, ORCID: 0000-0001-7446-4105

⁴ Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49000, Дніпро, Україна, тел.+38 (056) 713-59-51; відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Акад. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Дніпро, Україна, тел.+38 (056) 790-05-14, e-mail: rostislavpodolskij@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0288-0641

Анотація. *Мета дослідження* – аналіз результатів існуючих досліджень щодо впливу гарячої деформації на показники якості та способів оцінювання деформаційного пророблення макро- та мікроструктури металопродукції з конструкційних сталей. *Аналіз публікацій.* Питаннями дослідження впливу режимів деформації на пророблення структури готових виробів займалися багато колективів учених, таких як О. П. Чекмарьов, І. Я. Тарновський, М. Я. Дзугутов, В. О. Тюрін і їх послідовники. Наразі опубліковано велику кількість праць, в яких наведено результати досліджень впливу ступеня деформації на структуру і механічні властивості прокату з безперервнолитих заготовок. *Результати.* За результатами аналізу встановлено, що сучасні технології виробництва безперервнолитих заготовок (БЛЗ) і гарячої прокатки дозволяють забезпечити відповідність якості поверхні, макро- і мікроструктури, механічних властивостей прокату при певному коефіцієнті загальної витяжки. Мінімальний коефіцієнт витяжки, необхідний для мінімізації дефектів макроструктури та стабілізації механічних властивостей, збільшується з ростом умісту вуглецю та легуючих елементів у сталі. *Наукова новизна.* Дано визначення деформаційної пророблюваності з позицій матеріалознавства як роздроблення дендритної структури литого металу в процесі деформації початкового злитка. На пророблюваність структури сталі під час гарячої деформації впливає розмір початкової безперервнолитої заготовки через її макроструктуру та схему напружено-деформованого стану: чим більший переріз БЛЗ, тим більш нерівномірна лита структура та несприятливий напружено-деформований стан у центральній зоні заготовки. *Практична значимість.* Розроблено методологічні основи для кількісної оцінки прямого впливу деформаційної дії на мікроструктуру конструкційних сталей з використанням коефіцієнта пророблюваності структури К. Це дозволяє виконати кількісне оцінювання інтенсивності та локалізації деформації в об'ємі заготовки та дає можливість аналізувати технологічні процеси обробки металів тиском зі свідомо високим ступенем нерівномірності деформації.

Ключові слова: *безперервнолита заготовка; дендритна структура; осьова пористість; гаряча пластична деформація; конструкційна сталь; коефіцієнт витяжки*

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ПРОРАБОТКИ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ НА МАКРО- И МИКРОСТРУКТУРУ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ (обзор)

БАБАЧЕНКО А. И.¹, *докт. техн. наук*,
ДЕМИНА К. Г.², *канд. техн. наук*,

КОНОНЕНКО А. А.³, канд. техн. наук,
ПОДОЛЬСКИЙ Р. В.^{4*}

¹ Отдел проблем деформационно-термической обработки конструкционных сталей, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, пл. Акад. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: A_Babachenko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-2869-3478

² Отдел проблем деформационно-термической обработки конструкционных сталей, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, пл. Акад. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: katya20@ua.fm, ORCID ID: 0000-0001-9668-8169

³ Отдел проблем деформационно-термической обработки конструкционных сталей, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, пл. Акад. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: perlit@ua.fm, ORCID ID: 0000-0001-7446-4105

^{4*} Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49000, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 713-59-51; отдел проблем деформационно-термической обработки конструкционных сталей, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, пл. Акад. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: rostislavpodolskij@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0288-0641

Аннотация. *Цель исследования* – анализ результатов существующих исследований влияния горячей деформации на показатели качества и способов оценки деформационной проработки макро- и микроструктуры металлопродукции из конструкционных сталей. *Анализ публикаций.* Вопросами исследования влияния режимов деформации на проработку структуры готовых изделий занималось много ученых, таких как А. П. Чекмарев, И. Я. Тарновский, Н. Я. Дзугутов, В. А. Тюрин и их последователи. К настоящему времени опубликовано большое количество работ, в которых приведены результаты исследований влияния степени деформации на структуру и механические свойства проката из непрерывнолитой заготовки (НЛЗ). *Результаты.* По результатам анализа установлено, что современные технологии производства непрерывнолитых заготовок и горячей прокатки позволяют обеспечить соответствие качества поверхности, макро- и микроструктуры, механических свойств проката при определенном коэффициенте общей вытяжки. Минимальный коэффициент вытяжки, необходимый для минимизации дефектов макроструктуры и стабилизации механических свойств, увеличивается с ростом содержания углерода и легирующих элементов в стали. *Научная новизна.* Дано определение деформационной проработки с позиций материаловедения как раздробление дендритной структуры литого металла в процессе деформации начального слитка. На проработку структуры стали при горячей деформации влияет размер начальной непрерывнолитой заготовки из-за ее макроструктуры и схемы напряженно-деформированного состояния: чем больше сечение НЛЗ, тем более неравномерна литая структура и неблагоприятное напряженно-деформированное состояние в центральной зоне заготовки. *Практическая значимость.* Разработаны методологические основы для количественной оценки прямого влияния деформационного воздействия на микроструктуру конструкционных сталей с использованием коэффициента проработанности структуры К. Это позволяет выполнить количественную оценку интенсивности и локализации деформации в объеме заготовки и дает возможность анализировать технологические процессы обработки металлов давлением с заведомо высокой степенью неравномерности деформации.

Ключевые слова: *беспрерывнолитая заготовка; дендритная структура; осевая пористость; горячая пластическая деформация; конструкционная сталь; коэффициент вытяжки*

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF DEFORMATION WORKING OF A CONTINUOUS BILLET ON MACRO- AND MICROSTRUCTURE OF STRUCTURAL STEEL (REVIEW)

BABACHENKO O.I.¹, Dr. Sc. (Tech.),
DIOMINA K.H.², Cand. Sc. (Tech.),
KONONENKO H.A.³, Cand. Sc. (Tech.),
PODOLSKYI R.V.^{4*}

¹ Department of structural steels' deformation and heat treatment problems, Iron and Steel Institute named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Ak. Starodubova K. F. sq., 49107, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: A_Babachenko@i.ua, ORCID: 0000-0002-2869-3478

² Department of structural steels' deformation and heat treatment problems, Iron and Steel Institute named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Ak. Starodubova K. F. Sq., 49107, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: katya20@ua.fm, ORCID: 0000-0001-9668-8169

³ Department of structural steels' deformation and heat treatment problems, Iron and Steel Institute named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Ak. Starodubova K. F. Sq., 49107, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: perlit@ua.fm, ORCID: 0000-0001-7446-4105

⁴ Department of heat treatment of metals, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina Ave., 49000, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 713-59-51; the department of structural steels' deformation and heat treatment problems, Iron and Steel Institute named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Ak. Starodubova K. F. Sq., 49107, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: rostislavpodolskij@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0288-0641

Abstract. *The purpose of the study* is to analyze the results of existing studies of the effect of hot deformation on quality indicators and methods for assessing the deformation processing of the macro- and microstructure of metal products made of structural steels. *Analysis of existing publications on the subject* – matters of research of influence of deformation modes in the elaboration of the structure of the finished product takes a lot of teams of scientists, such as A.P. Chekmarev, I.Yu. Tarnowskyi, N.Yu. Dzugutov, V.A. Tyurin and their followers. Now, a large number of works have been published, which provide the results of studies of the effect of the degree of deformation on the structure and mechanical properties of rolled products from a continuously cast billet. **Results.** Based on the results of the analysis, it was found that modern technologies for the production of continuously cast billets and hot rolling make it possible to ensure compliance with the surface quality, macro- and microstructure, mechanical properties of rolled products at a certain coefficient of total stretch. The minimum coefficient of drawing required to minimize the macrostructure defects and mechanical properties of stabilization, increases with increasing carbon content and alloying elements in the steel. **Scientific novelty.** This definition of deformation processing from the standpoint of materials science, as fragmentation of the dendritic structure of cast metal in the process of deformation of the initial ingot. The design of the steel structure during hot deformation is influenced by the size of the initial continuously cast billet due to its macrostructure and the stress-strain state pattern: the larger the BLZ section, the more uneven the cast structure and unfavorable stress-strain state in the central zone of the billet. **Practical significance.** The developed methodological foundations for a quantitative assessment of the direct effect of deformation effect on the microstructure of structural steels using the structural development coefficient K . This allows for a quantitative assessment of the intensity and localization of deformation in the volume of the workpiece and makes it possible to analyze the technological processes of metal forming with a deliberately high degree of non-uniformity of deformation.

Keywords: *continuous billet; dendritic structure; axial porosity; hot plastic deformation; structural steel; extraction ratio*

Сучасний стан проблеми. Безперервна розливка сталі – найважливіший технологічний етап у виробництві металопродукції, оскільки забезпечує перехід сталі з рідкого стану в твердий із наданням їй певної геометричної форми [1]. Крім цього, умови охолодження та затвердіння сталі під час безперервної розливки великою мірою визначають якість металопродукції порівняно з консервативною розливкою в злитки.

На практиці завдання підвищення якості металопродукції, особливо великих перерізів, виробленої з безперервнолитої заготовки (БЛЗ), пов'язане з низкою труднощів. По-перше, це розміри поперечного перерізу початкової БЛЗ (у світовій металургійній практиці максимальні розміри перерізу безперервнолитого блюма становлять 600×670 мм, максимальний діаметр злитка за безперервного розливання сталі складає 600 мм), що, у свою чергу, обмежує

підвищення коефіцієнта витяжки λ під час прокатки або коефіцієнта уковування γ під час кування [2].

По-друге, нерівномірність розподілу деформації по висоті та ширині заготовок великих перерізів: у напрямку від поверхні до осі злитка пластична деформація швидко згасає, і на певній відстані від контактної поверхні з деформуючим інструментом зберігаються центральні шари, які не піддаються інтенсивній пластичній деформації, тобто залишаються непроробленими.

По-третє, наявність внутрішніх дефектів макроструктури (осьова пухкість, пористість, ліквіація, кристалізаційні тріщини і т. д.). З огляду на специфічні умови затвердіння БЛЗ великого перерізу повністю виключити появу окремих дефектів макроструктури практично неможливо.

Внутрішні дефекти та структурна нерівномірність зумовлюють незадовільні

результати ультразвукового контролю (УЗК) і механічних випробувань металопродукції. Наприклад, під час освоєння технології виробництва залізничних осей з БЛЗ через наявність внутрішніх дефектів і структурної нерівномірності брак УЗК може сягати приблизно 20 % осей кожної плавки, а наявність вираженої різнозернистості в низці випадків стає причиною зниженого рівня показників пластичності та в'язкості.

Один із способів підвищення якості деяких видів великосортного прокату, в тому числі й осей залізничних вагонів, – це поліпшення пророблення структури початкової литої заготовки в процесі гарячої пластичної деформації. Під терміном «пророблення» або «пророблюваність» розуміється роздроблення дендритної структури литого металу в процесі деформації початкового злитка [3].

У зв'язку із цим **мета** цієї оглядової статті полягала в аналізі результатів існуючих досліджень щодо впливу гарячої деформації на показники якості та способів оцінювання деформаційного пророблення макро- та мікроструктури металопродукції з конструкційних сталей.

Аналіз існуючих публікацій за темою. Дослідженням впливу режимів деформації на пророблення структури готових виробів займалося багато видатних вчених у галузі прокатного виробництва: О. П. Чекмарьов, І. Я. Тарновський, а в галузі кувалного виробництва – М. Я. Дзугутов, В. О. Тюрін і їх послідовники [4–11].

Особливістю робіт цих авторів був експериментальний підхід до вивчення пророблюваності як у лабораторних, так і в виробничих умовах. Основний висновок, який можна зробити за результатами цих досліджень, полягає в тому, що інтенсифікація режимів деформації практично завжди позитивно позначається на проробленні внутрішніх ділянок виробів, що деформуються.

Дотепер опубліковано велику кількість праць, в яких наведено результати досліджень впливу ступеня деформації на структуру і механічні властивості прокату з безперервнолитих заготовок [12 – 27].

Аналізуючи результати існуючих досліджень [12–21; 24] щодо впливу ступеня деформації на пророблення безперервнолитого металу для зменшення ступеня розвитку дефектів макроструктури і поліпшення комплексу механічних властивостей, можна зробити висновок, що для отримання якісних і напівфабрикату, і готової металопродукції мінімальний коефіцієнт витяжки λ може змінюватись у широких межах – від 1,2 до 21,0. Такий великий діапазон його значень пояснюється тим, що досліджено різні марки сталі, перерізи БЛЗ, показники механічних властивостей (міцність, пластичність, ударна в'язкість). Крім того, механічні властивості визначали в різних перерізах готового прокату.

Однак, незважаючи на відсутність у технічній літературі узагальнювальних залежностей, характер впливу коефіцієнта витяжки приблизно однаковий – з його збільшенням комплекс механічних властивостей прокату підвищується.

На підставі виконаних досліджень зроблено висновок що рівномірність механічних властивостей по перерізу прокату досягається вже за коефіцієнта витяжки $\lambda = 4$. Залишкова лита структура, що спостерігається за високих ступенів деформації, не чинить вирішального впливу на механічні властивості. Характеристики міцності катаного металу, отриманого з литих заготовок, у переважній більшості задовольняють вимогам стандартів і технічних умов уже при невеликій витяжці $\lambda = 5...6$. Усунення анізотропії механічних властивостей можливе за коефіцієнта загальної витяжки $\lambda = 7...10$. За коефіцієнта $\lambda = 10, 13$ і 15 структура стає переважно смугастою із залишками литої структури в проміжній зоні. Тільки у разі деформації з $\lambda = 18$ і більше досягається досить чітка волокниста структура, при цьому залишків литої структури не спостерігається. Причому, як неодноразово було зазначено [12–16; 19–21], зі збільшенням коефіцієнта витяжки інтенсивність росту значень механічних властивостей знижується.

Крім цього, автори публікації [21] зазначають, що розвиток сталеплавильного і прокатного виробництва, зокрема, широке поширення позапічної обробки, вдосконалення технології безперервної розливки і прокатки дозволяють одержувати більш якісний метал як шляхом поліпшення якості початкової заготовки, так і регламентації температурно-деформаційного режиму. Проведені ними дослідження дозволили зробити два важливі висновки:

1) сучасні технології виробництва безперервнолитих заготовок і гарячої прокатки дозволяють забезпечити відповідність якості поверхні, макро- і мікроструктури, механічних властивостей прокату за коефіцієнта загальної витяжки $\lambda = 3...6$ для сортового прокату і $\lambda = 2,5...4$ для трубних заготовок;

2) для виробництва сортового прокату з контрольованою макроструктурою за малих ступенів обтиску необхідно, щоб у макроструктурі безперервнолитих заготовок точкова неоднорідність не перевищувала її стандартних значень для готового прокату, а осьова пористість і осьова хімічна неоднорідність не перевищували цих вимог більше ніж на 1,5 і 0,5 бала відповідно.

Ідею контролю та регламентації ступеня розвитку дефектів макроструктури початкових безперервнолитих заготовок використовували А. І. Рудський, В. О. Луньов і їхні колеги у своїх працях [22; 23]. Це дозволило в умовах виробництва ВАТ «Северсталь» установити мінімальний уков для формування необхідної макро- і мікроструктури сортового прокату, отриманого з литої заготовки: для вуглецевої якісної низьколегованої сталі – 7, для металокордових і канатних сталей – 11, шарикопідшипникових – 15. Оцінювання пророблюваності перерізу здійснювали по карбідній сітці, центральній пористості, осьовій ліквациї, ліквацийних смужках, тріщинах і точкових крайових забрудненнях.

У подальшому, як заходи щодо підвищення ступеня укову, автори

пропонують збільшити розмір поперечного перерізу литої заготовки з 150×150 мм до 260×260 мм.

У своїх подальших працях [24; 25] Є. М. Смирнов і його колеги визначили вплив сумарної витяжки (λ_{Σ}) під час прокатки на зміну механічних властивостей металу безперервнолитої заготовки зі сталі 45 і дослідили поведінку дефектів осьової зони сортової безперервнолитої заготовки зі сталі 45 і У7 під час прокатки.

У статті [25] наведено результати досліджень макроструктури сортових безперервнолитих заготовок із близьким розміром перерізу 130×130 мм і 125×125 мм зі сталей марки 45 (ГОСТ 1050-88) і марки У7 (ДСТУ 3833-98) та поведінки осьових дефектів БЛЗ під час прокатки.

Із кожної відібраної проби виготовляли поперечні темплети (рис. 1, а) для оцінювання макроструктури заготовки за вимогами СОУ МПП 77.040 – 199: 2007, а також поздовжні темплети (рис. 1, б) – для дослідження розподілу дефектів осьової зони по довжині БЛЗ.

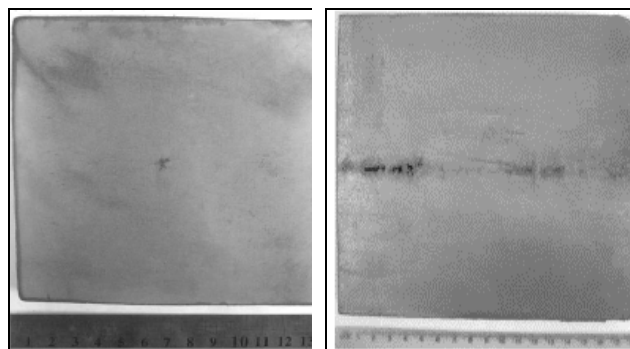


Рис. 1. Макроструктура темплетів безперервнолитої заготовки 130×130 мм зі сталі 45: в поперечному (а) і у поздовжньому напрямку (б) [25]

Аналіз параметрів макроструктури дозволив авторам говорити про досить високу якість досліджених безперервнолитих заготовок. У свою чергу, аналіз макроструктури металу на поздовжніх темплетах показав, що якість осьової зони безперервнолитої заготовки має нестабільний характер. Тому бал осьової пористості та осьової ліквациї багато в чому

визначається місцем вирізки темплета і, що природно, може мати досить широкий діапазон коливань. У даному випадку ширина діапазону коливань параметрів склала 1,5 бала.

Таким чином, незважаючи на досить високу якість макроструктури, в осьовій зоні присутні пористість і ліквіація, які спричиняють проблеми під час подальшої прокатки.

Автори статті [26] акцентують увагу на тому, що для кожного прокатного стану важливо визначити раціональний розмір перерізу безперервнолитих заготовок, що забезпечує високу якість прокату всього розмірного та марочного сортаменту. У результаті були отримані залежності, що дозволяють розрахувати величину мінімального ступеня витяжки, необхідного для стабілізації механічних властивостей, а також забезпечення вимог до осьової пористості та ліквіації гарячекатаного сортового прокату. На базі запропонованих залежностей розроблено методику вибору поперечного перерізу безперервнолитої заготовки для виробництва сортового прокату, що враховує також забезпечення допустимої глибини дефектів поверхні.

Для формалізації процесу визначення вимог до безперервнолитої заготовки запропоновано таку градацію прокату:

- група 1 – прокат із вуглецевої сталі звичайної якості;
- група 2 – прокат із вуглецевої якісної конструкційної сталі;
- група 3 – прокат із вуглецевої якісної конструкційної сталі з підвищеними вимогами до ударної в'язкості, пластичності, штампованості; осадки; прокат із низьколегованої та легованої сталі.

Для багатьох видів прокату регламентуються вимоги до таких дефектів макроструктури як центральна пористість (ЦП), точкова неоднорідність (ТН), ліквіаційний квадрат (ЛК), підусадкова ліквіація (Л), плямиста ліквіація (ПЛ). Усереднені вимоги діючих в Україні стандартів до показників якості макроструктури готового прокату груп якості 2 і 3 показані в таблиці 1.

Таблиця 1

Усереднені вимоги до показників якості макроструктури готового прокату

Група якості	Діаметр прокату, мм	Допустимий бал дефектів макроструктури				
		ЦП	ТН	ЛК	Л	ПЛ
1*	–	3	3	3	2	2
2	–	2	2	1	1	2
3	до 80	1	1	0	1	0
	більше 80	2	2	0	1	1

Примітка: для групи якості 1 – значення, прийняті авторами [26].

За даними публікацій [21; 22], точкова неоднорідність і плямиста ліквіація під час деформації не змінюються. Зміна центральної (осьової) пористості та ліквіації в першому наближенні прийнята авторами [26] однаковою.

На основі аналізу та обробки експериментальних даних зміни дефектів макроструктури в процесі деформації, наведених у працях [13; 15; 21; 22], запропоновано рівняння, що описує зміну осьової пористості та ліквіації від ступеня витяжки:

$$M(\lambda) = M_{БЛЗ} - \ln(\lambda) \times \sqrt{0,5 \cdot M_{БЛЗ}} \quad (1)$$

де λ – коефіцієнт витяжки; $M_{БЛЗ}$ – бал центральної пористості та ліквіації безперервнолитої заготовки;

На рисунку 2 показано значення $M(\lambda)$, розраховані за даним рівнянням залежно від ступеня розвитку дефектів у макроструктурі початкової БЛЗ. Отримана залежність якісно узгоджується з експериментально отриманою залежністю динаміки зміни осьової пористості литого металу в процесі деформації [27].

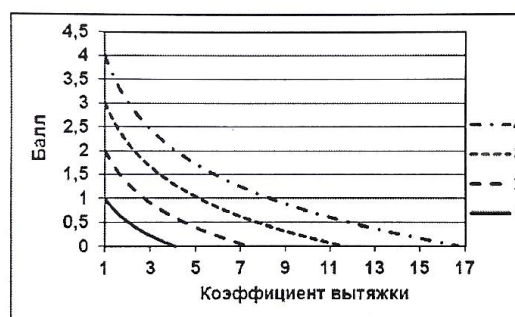


Рис. 2. Вплив коефіцієнта витяжки на проробку макроструктури безперервнолитої заготовки: 1, 2, 3, 4 – бал центральної (осьової) пористості та ліквіації в макроструктурі БЛЗ [26]

Для перевірки цих залежностей використовували експериментальні дані про зміну центральної пористості під час прокатки БЛЗ перерізом 335 × 400 мм для отримання круглої заготовки діаметром Ø 210 – 270 мм в умовах виробництва ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат ім. Ф. Е. Дзержинського» і

прокатки зі слябів листового прокату (за літературними даними [28]).

У першому випадку ступінь розвитку осьової пористості відповідав 4-му балу. У другому випадку центральна пористість досліджених безперервнолитих заготовок склала 1,5...3,0 бали. Порівняння розрахункових даних з експериментальними даними показано на рисунках 3 і 4.

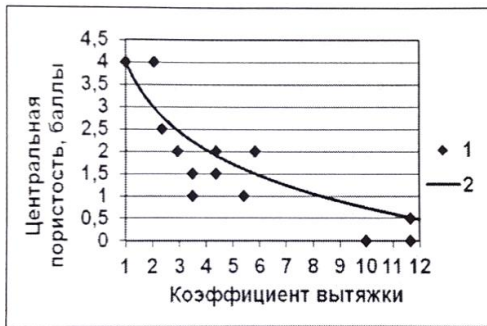


Рис. 3. Порівняння розрахункових даних з експериментальними даними [26]:
1 – експериментальні дані [28];
2 – розрахункові дані

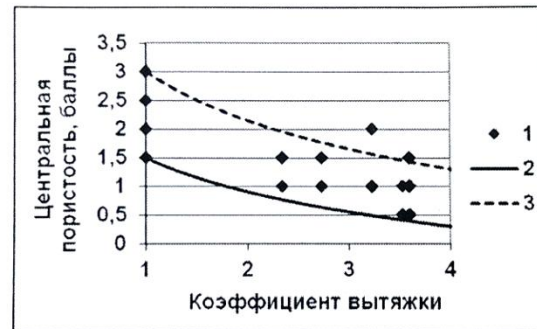


Рис. 4. Вплив коефіцієнта витяжки на центральну пористість прокату круглого перерізу [26]:
1 – експериментальні дані; 2 – розрахункові дані за ступеня розвитку центральної пористості в макроструктурі БЛЗ 1,5 бала; 3 – розрахункові дані за ступеня розвитку центральної пористості в макроструктурі БЛЗ 3 бали

Для розрахунку допустимої величини центральної пористості в макроструктурі БЛЗ залежно від допустимої пористості прокату ($M_{ПР}$) рівняння (1) приведено до такого вигляду:

$$M_{БЛЗ} = \frac{(\ln \lambda)^2 \cdot 0,5^2 + \sqrt{(\ln \lambda)^2 \cdot 0,5^2 + 4 \cdot M_{ПР}^2}}{2} \quad (2)$$

На рисунку 5 показані розраховані за рівнянням (2) значення $M_{БЛЗ}$ залежно від необхідного стану макроструктури готового прокату та коефіцієнта витяжки.



Рис. 5. Максимально допустимий бал центральної пористості та ліквіації в макроструктурі БЛЗ залежно від вимог до макроструктури готового прокату і коефіцієнта витяжки: 0, 1, 2, 3 – бал центральної пористості та підусадкової ліквіації

Однак, незважаючи на достатню кількість досліджень, спрямованих на аналіз впливу гарячої деформації на особливості макроструктури і напівфабрикату, і готової металопродукції, питання про *прямий* вплив деформації на мікроструктуру сталі залишається недостатньо вивченим.

Сучасний етап розвитку методів моделювання процесів обробки металів тиском характеризується появою великої кількості праць, в яких тим чи іншим чином робляться спроби зв'язати особливості будови матеріалів з характером їх деформації [29–33]. У цих працях авторам удалося концептуально визначити рівні перебігу процесів пластичної деформації й експериментально зв'язати явища локалізації деформації з нерівномірністю розподілу мікроструктурних параметрів.

Основним результатом математичного моделювання процесів знеміцнювання сплавів за запропонованими моделями став середній умовний діаметр зерна їх мікроструктури. Це найважливіша характеристика мікроструктури, яка

емпірично пов'язана з механічними властивостями металів і сплавів. Однак через перебіг низки структурних перетворень після припинення деформаційної дії в температурній області гарячої деформації розмір зерна дозволяє тільки побічно судити про її інтенсивність і локалізацію. Тому для встановлення прямого впливу гарячої деформації на мікроструктуру сталі та всебічного, глибокого аналізу напружено-деформованого стану (НДС) необхідно визначити ту структурну складову сталі, яка на мікрорівні не зазнавала б ні фазових, ні структурних перетворень і змогла б повною мірою відобразити процес деформації і течії металу.

Одним із перших досліджень у цьому напрямку по праву можна вважати працю [3], автори якої, вивчаючи поведінку неметалевих включень, змогли якісно і кількісно судити про місцеві ступені деформації і пророблюваності різних зон злитка масою 39,5 т зі сталі 38ХНЗМФА в результаті прямого пресування. Для характеристики розподілу деформацій в металі введено показник пророблюваності a , який визначається як частка від ділення відносної площі F , зайнятої неметалевими включеннями, до їх кількості n .

Незважаючи на те, що отримана залежність показника пророблюваності a від коефіцієнта витяжки λ має неоднозначний характер, важливість цього дослідження в тому, що його автори показали можливість оцінювання пророблюваності різних поковок за металографічною характеристикою. Тобто за відповідною методикою металографічного аналізу не тільки макроструктура, а й мікроструктура сталі здатна відобразити *прямий* вплив деформаційної дії на її складові.

Такою особливістю мікроструктури конструкційних сталей постає хімічна неоднорідність, яка утворюється в процесі кристалізації, в результаті дендритної ліквідації легуючих і домішкових елементів. Тому в мікроструктурі вона повністю відображає обриси дендритів (від *грец.* δένδρον – дерево), звідси і поява

терміна «сліди» дендритної структури. На її властивості залишатися практично постійною в кількісному відношенні за подальшої температурної і деформаційної дії, незважаючи на значну тривалість процесу нагріву і витримки за високих температур, але при цьому змінювати свою форму і розміри, заснований розроблений в Інституті чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України метод оцінювання деформованого стану металу зі зміни параметрів колишньої дендритної структури [34; 35].

За показник пророблюваності прийнято металографічну характеристику – щільність «слідів» дендритної структури. Її зміни повною мірою відображають деформований стан металу в будь-якому місці перерізу і напівфабрикату, і готової металопродукції. При цьому середня відносна зміна щільності «слідів» дендритної структури по перерізу заготовок у початковому (до деформації) і деформованому стані добре узгоджується з коефіцієнтом фактичної витяжки λ .

Подальший розвиток метод оцінювання деформованого стану металу зі зміни щільності «слідів» дендритної структури конструкційних сталей отримав у публікації [36]. Розглянемо, як працює цей метод, більш детально.

Щільність лінійних елементів в об'ємі сплаву – відома металографічна характеристика [37]. При цьому автори праці [36] для аналізу дендритної структури пропонують оперувати не «лінійними елементами», а «площинними фігурами», тобто щільність дендритної структури визначати як кількість дендритів N , зосереджених на 1 мм^2 площі шліфа металографічного зразка (рис. 6).

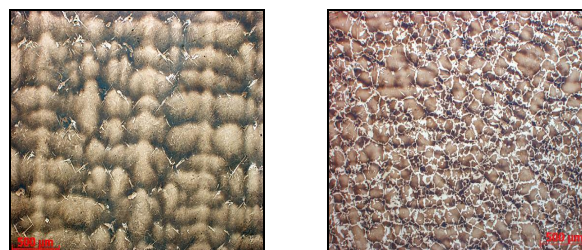


Рис. 6. «Сліди» колишніх дендритів у мікроструктурі сталі марки 45, $\times 500$: а – БЛЗ 335 \times 400 мм, б – трубна заготовка \varnothing 230 мм

Для кількісного оцінювання впливу пластичної деформації на щільність слідів дендритної структури спочатку визначається величина її ущільнення C (від англ. *compaction* – ущільнення, стиснення, пресування):

$$C = \frac{N_2}{N_1}, \quad (3)$$

де N_1 – щільність слідів дендритної структури в початковому стані (до деформації); N_2 – щільність слідів дендритної структури в деформованому стані.

Цей параметр характеризує, як у процесі прокатки відбувається природна витяжка для кожного аналізованого шару заготовки і наскільки його величина відрізняється від коефіцієнта фактичної витяжки λ . За критерій оцінювання роботи методу визначення пророблюваності структури прийнято загальний коефіцієнт витяжки λ – відношення площі поперечного перерізу заготовки до та після деформації.

Для встановлення залежності ущільнення структури в процесі деформації від величини фактичної витяжки запропоновано коефіцієнт пророблюваності слідів дендритної структури K , який визначається за формулою:

$$K = 1 - \delta_\lambda, \quad (4)$$

де δ_λ – відхилення величини ущільнення слідів дендритної структури C від загального коефіцієнта витяжки λ .

Якщо $K < 1$, то під час прокатки структура металу в цих шарах заготовки не зазнає особливого деформаційного впливу. Якщо $K > 1$, під час прокатки структура металу заготовки в таких мікрооб'ємах перебуває в зоні інтенсивної пластичної деформації.

Наприклад, щільність «слідів» дендритів у литій та деформованій структурі сталі 45 на відстані $\sim \frac{1}{8}$ товщини від поверхні заготовок становить 36 і 152 шт./мм² відповідно (рис. 6). Тоді величина ущільнення «слідів» дендритної структури C (1.3) на відстані $\sim 75\%$ радіуса трубної заготовки складає 4,2 раза за

загального коефіцієнта витяжки $\lambda = 3,23$ для процесу поздовжньої прокатки БЛЗ 335 × 400 мм на трубозаготівельному стані 900/750-3. Тоді коефіцієнт пророблюваності структури (1.4) $K = 1,3$. Отже, під час прокатки структура металу в даному шарі перебувало в зоні інтенсивної (активної) пластичної деформації трубної заготовки $\varnothing 230$ мм.

Таким чином, у дослідженні прямого впливу деформаційної дії на мікроструктуру конструкційних сталей використання її структурної складової – хімічної неоднорідності, успадкованої від дендритної ліквіації кремнію і марганцю, – дозволяє виконати кількісне оцінювання інтенсивності та локалізації деформації в об'ємі заготовки. При цьому використання коефіцієнта пророблюваності структури сталі K дає можливість аналізувати технологічні процеси обробки металів тиском зі свідомо високим ступенем нерівномірності деформації, що особливо актуально для гарячекатаного прокату великих перерізів і таких видів металопродукції як залізничні колеса та осі.

Висновки. На підставі викладеного аналітичного огляду літературних даних щодо аналізу впливу гарячої деформації на показники якості та існуючих способів оцінювання деформаційного пророблення макро- та мікроструктури металопродукції з конструкційних сталей можна зробити такі основні висновки.

1) Сучасні технології виробництва безперервнолитих заготовок і гарячої прокатки дозволяють забезпечити відповідність якості поверхні, макро- і мікроструктури, механічних властивостей прокату за коефіцієнта загальної витяжки $\lambda = 3...6$ для сортового прокату і $\lambda = 2,5...4$ для трубних заготовок. Усунення анізотропії механічних властивостей можливе за коефіцієнта загальної витяжки $\lambda = 7...10$, але тільки у разі $\lambda = 18$ і більше досягається досить чітка волокниста структура, при цьому залишків литої (дендритної) структури не спостерігається.

2) Для виробництва сортового прокату з контрольованою макроструктурою за малих

ступенів обтиску необхідно, щоб у макроструктурі безперервнолитих заготовок точкова неоднорідність не перевищувала її стандартних значень для готового прокату, а осьова пористість й осьова хімічна неоднорідність не перевищували цих вимог більше, ніж на 1,5 і 0,5 бала відповідно.

3) Мінімальний коефіцієнт витяжки, необхідний для мінімізації дефектів макроструктури та стабілізації механічних властивостей, збільшується з ростом умісту вуглецю та легуючих елементів у сталі (в першу чергу, це стосується показників пластичності та ударної в'язкості).

4) На пророблюваність структури сталі під час гарячої деформації впливає розмір початкової безперервнолитої заготовки

через її макроструктуру та схему напружено-деформованого стану: чим більший переріз БЛЗ, тим більш нерівномірна лита структура та несприятливий напружено-деформований стан у центральній зоні заготовки.

5) Для оцінювання *прямого* впливу деформаційної дії на мікроструктуру конструкційних сталей використання коефіцієнта пророблюваності структури K дозволяє виконати кількісне оцінювання інтенсивності та локалізації деформації в об'ємі заготовки та дає можливість аналізувати технологічні процеси обробки металів тиском зі свідомо високим ступенем нерівномірності деформації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Смирнов А. Н., Куберский С. В., Штефан Е. В. Непрерывная разливка стали. Донецк : ДонНТУ, 2011. 482 с.
2. Непрерывная разливка стали. Раздел 1.1. История развития, сущность, преимущества и особенности непрерывной разливки стали. [Электронный ресурс]. Украинская Ассоциация Сталеплавателей. Информационный портал о чёрной и цветной металлургии. URL : <http://www.uas.su/books/mnlz/1/razdel1.php>.
3. Лебедев В. Н., Троицкий В. П., Антошенков Ю. М., Коровина В. М. Определение степени прорабатываемости металла при деформировании. *Известия вузов. Чёрная металлургия*. 1977. № 3. С. 109–111.
4. Чекмарёв А. П., Павлов В. Л., Клименко В. М. [и др.] Интенсификация режима обжатий на блюминге. *Сталь*. 1955. № 10. С. 916–921.
5. Чекмарёв А. П., Павлов В. Л., Мелешко В. И., Токарев В. А. Теория прокатки крупных слитков. Москва : Металлургия, 1968. 252 с.
6. Тарновский И. Я., Пальмов Е. В., Тягунов В. А. [и др.]. Прокатка на блюминге. Москва : Металлургиздат, 1963. 390 с.
7. Дзугутов М. Я. Внутренние разрывы при обработке металлов давлением. Москва : Металлургиздат, 1958. 208 с.
8. Дзугутов М. Я. Пластическая деформация высоколегированных сталей и сплавов. Москва : Металлургия, 1977. 480 с.
9. Охрименко Я. М., Тюрин В. А. Теория процессовковки. Москва : Высшая школа, 1977. 295 с.
10. Белова Л. П., Тюрин В. А., Дубков А. Н. Влияние схемыковки на деформирование центральных слоев заготовки. *Известия вузов. Чёрная металлургия*. 1982. № 5. С. 70–74.
11. Тюрин В. А., Лазоркин В. А., Поспелов И. А., Флаховский Х. П. Ковка на радиально-обжимных машинах. Москва : Машиностроение, 1990. 256 с.
12. Гладышев Н. Г., Дружинин В. П., Федорчук Е. В. [и др.] Качество горячекатаной стали, полученной из непрерывнолитой заготовки. *Бюллетень ЦНИИИТЭИЧМ*. 1965. № 10 (510). С. 42–43.
13. Чижиков А. И., Иохимович В. Л., Рачук Г. П. [и др.] Влияние величины деформации на качество сортового проката из непрерывнолитых заготовок. *Бюллетень ЦНИИИТЭИЧМ*. 1966. № 2 (526). С. 36–37.
14. Энгельман В., Фосс Х., Кольп Р. Обрабатываемость давлением заготовок непрерывной разливки. *Чёрные металлы*. 1967. № 17. С. 27–34.
15. Поляков В. В., Канн Ю. Е., Мартынов О. В. и др. Качество сортового проката из непрерывнолитых заготовок. *Бюллетень ЦНИИИТЭИЧМ*. 1967. № 15 (563). С. 53–54.
16. Подвинцев А. Д., Чижиков А. И., Зебзеев Ф. Д. и др. Качество проката и штампованных изделий из непрерывных слитков крупного сечения. *Проблемы стального слитка : тр. III конф. по слитку*. Москва : Металлургия, 1969. С. 384–386.
17. Kiss E. Walztechnische Probleme bei der Warmumformung von Stranggubknüppeln. *Neue Hutte*. 1974. № 2. Pp. 77–82.
18. Ushijima K. Working process and resulting properties of continuously casting steel. Kiyoto Ushijima. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1975. Vol. 15, № 7. Pp. 380–392.

19. Пастряк З. Прокатка непрерывнолитых заготовок. *Обзор по системе «Информсталь»*. 1983. Вып. 3 (152). 35 с.
20. Ревтов Н. И. Влияние степени деформации при прокатке на структуру и свойства непрерывнолитой заготовки. *Известия ВУЗов. Чёрная металлургия*. 1986. № 8. С. 55–58.
21. Либерман Л. А., Дубровин И. В., Таланов И. И. [и др.]. Минимальное обжатие непрерывнолитых заготовок для получения качественного проката. *Металлург*. 1993. № 4. С. 31–34.
22. Рудской А. И., Лунёв В. А., Щеглова Е. Г. [и др.]. Поведение дефектов макро- и микроструктуры непрерывнолитой заготовки при сортовой прокатке. *Металлообработка*. 2006. № 4 (34). С. 52–54.
23. Рудской А. И., Лунёв В. А. Теория и технология прокатного производства [Текст]: учеб. пособ. Санкт-Петербург : Наука, 2008. 527 с.
24. Смирнов С. М., Белевітін В. О., Ігнатів Р. С. [та ін.] К питанню щодо впливу сумарної витяжки на зміну межі плину сталі 45 при прокатці безперервнолитих заготовок в перших проходах. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»* : зб. наук. пр. Нові рішення в сучасних технологіях : тематичний випуск. Харків : НТУ «ХПІ», 2011. № 47. С. 92–97.
25. Смирнов Е. Н., Серов А. И., Скляр В. А., Домбровский Е. О., Смирнов О. Е. Исследование макроструктуры сортовой непрерывнолитой заготовки и поведения дефектов её осевой зоны во время прокатки. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2015. № 47 (1166). С. 57–61.
26. Бадюк С. И., Воробей С. А. Выбор размера поперечного сечения непрерывнолитой заготовки для производства сортового проката. *Обработка металлов давлением*. 2013. № 2 (35). С. 181–187.
27. Смирнов Е. Н., Митьев А. П., Григорьев М. В. [и др.] Развитие методологии физического моделирования поведения осевой усадочной раковины и пористости. *Наукові праці ДонНТУ. Серія: Металургія*. Донецьк : ДонГТУ, 2002. Вып. № 40. С. 133–139.
28. Подберёзный Н. П., Максименко О. П., Бродский С. С. [и др.] Особенности изменения свойств листов, прокатываемых из непрерывнолитой заготовки. *Металл и литьё Украины*. 1998. № 5-6. С. 52–54.
29. Константинов Д. В., Корчунов А. Г. Мультимасштабное компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. *Вестник МГТУ им. И. Г. Носова*. 2015. № 1. С. 36–43.
30. Воробей С. А. Прогнозирование размера зёрен аустенита при горячей деформации стали. *Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии* : сб. научн. трудов. Днепропетровск : Візіон. 2008. Вып. 18. С. 222–232.
31. Wen-wu HE, Jian-sheng LIU, Hui-qui CHEN, Hui-guang GUO. Simulation and analysis on microstructure evolution of large generator retaining ring during multi-fire forging. *Advanced Materials Research*. 2010. Vols. 97–101. Pp. 176–181.
32. Duan Xing-Wang, Chen Hui-qui and Liu Jian-Sheng. Microstructure evolution of multi-heat forging and numerical simulation for 316LN steel. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2014. Vol. 7 (5). Pp. 1012–1016.
33. Zhaoyang Jin, Kai Yin, Kai Yan, Defeng Wu, Juan Liu, Zhenshan Cui. Finite element modeling on microstructure evolution during multi-pass hot compression for AZ31 alloys using incremental method. *Journal of Material Science & Technology*. 2017. Vol. 33. Pp. 1255–1262.
34. Левченко Г. В., Дёмина Е. Г., Воробей С. А., Нефедьева Е. Е., Мединский Г. А. Оценка деформированного состояния металла по изменению параметров дендритной структуры. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2009. № 5. С. 71–75.
35. Дёмина Е. Г. Метод определения степени накопленной деформации в трубных и колёсных заготовках по изменению плотности «следов» дендритной структуры. *Наука і металургія* : електр. вид. збірки наук. пр. Дніпро, 2017. Вип. 1. С. 44–61.
36. Дёмина Е. Г., Дементьева Ж. А., Миргородская А. С., Гунченко Д. В. Анализ прорабатываемости структуры стали 09Г2С в процессе горячей прокатки непрерывнолитой заготовки. *Наука і металургія* : електр. вид. збірки наук. пр. Вип. 2. Дніпро, 2018. С. 4–18. URL : <http://isi.gov.ua/wp-content/uploads/2018/09/збірка-статей.pdf>.
37. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. Москва : Металлургия, 1976. 271 с.

REFERENCES

1. Smirnov A.N., Kuberskij S.V. and Shtefan E.V. *Nepreryvnaja razlivka stali* [Continuous casting of steel]. Donetsk : DonNTU, 2011, 482 p. (in Russian).
2. *Nepreryvnaja razlivka stali. Razdel 1.1. Istorija razvitija, sushhnost', preimushhestva i osobennosti nepreryvnoj razlivki stali* [Continuous casting of steel. Section 1.1. Development history, essence, advantages and features of continuous steel casting]. Ukrainskaja Asociacija Staleplavil'shnikov. Informacionnyj portal o chornoj i cvetnoj metallurgii [Ukrainian Association of Steel Smelters. Information portal about ferrous and non-ferrous metallurgy]. URL: <http://www.uas.su/books/mnlz/1/razdel1.php>. (in Russian).

3. Lebedev V.N., Troitskiy V.P., Antoshenkov Ju.M. and Korovina V.M. *Opređenje stepeni prorabatyvaemosti metalla pri deformirovanii* [Determination of the degree of metal workability during deformation]. *Izvestija vuzov. Chjornaja metallurgija* [Izvestiya vuzov. Ferrous metallurgy]. 1977, no. 3, pp. 109–111. (in Russian).
4. Chekmarjov A.P., Pavlov V.L., Klimenko V.M. and oth. *Intensifikacija rezhima obzhatij na bljuminge* [Intensification of the squeezing regime on blooming]. *Stal'* [Steel]. 1955, no. 10, pp. 916–921. (in Russian).
5. Chekmarjov A.P., Pavlov V.L., Meleshko V.I. and Tokarev V.A. *Teorija prokatki krupnyh slitkov* [The theory of rolling large ingots]. *Metallurgija* [Metallurgy]. Moscow, 1968, 252 p. (in Russian).
6. Tarnovskij I.Ja., Pal'mov E.V., Tjagunov V.A. and oth. *Prokatka na bljuminge* [Rolling on blooming]. *Metallurgizdat* [Metallurgizdat]. Moscow, 1963, 390 p. (in Russian).
7. Dzugutov M.Ja. *Vnutrennie razryvy pri obrabotke metallov davleniem* [Internal breaks during metal pressure processing] *Metallurgizdat* [Metallurgizdat]. Moscow, 1958, 208 p. (in Russian).
8. Dzugutov M.Ja. *Plasticheskaja deformacija vysokolegirovannyh stalej i splavov* [Plastic deformation of high-alloy steels and alloys]. *Metallurgija* [Metallurgy]. Moscow, 1977, 480 p. (in Russian).
9. Ohrimenko Ja.M. and Tjurin V.A. *Teorija processov kovki* [Theory of forging processes]. *Vysshaja shkola* Moscow : Higher school Publ., 1977, 295 p. (in Russian).
10. Belova L.P., Tjurin V.A. and Dubkov A.N. *Vlijanie shemy kovki na deformirovanie central'nyh sloev zagotovki* [Influence of the forging scheme on the deformation of the central layers of the workpiece]. *Izvestija vuzov. Chjornaja metallurgija* [Izvestiya vuzov. Ferrous metallurgy]. 1982, no 5, pp. 70–74. (in Russian).
11. Tjurin V.A., Lazorkin V.A., Pospelov I.A. and Flahovskij H. P. *Kovka na radial'no-obzhimnyh mashinah* [Forging on radial crimping machines]. Moscow : Mashinostroyenie, 1990, 256 p. (in Russian).
12. Gladyshev N.G., Druzhinin V.P., Fedorchuk E.V. and oth. *Kachestvo gorjachekatanoj stali, poluchennoj iz nepreryvno litoj zagotovki* [The quality of hot-rolled steel obtained from continuously cast billets]. *Bjulleten' CNIITJeIChM* [Bulletin TsNIITEICHM]. 1965, no. 10 (510), pp. 42–43. (in Russian).
13. Chizhikov A.I., Iohimovich V.L., Rachuk G.P. and oth. *Vlijanie velichiny deformacii na kachestvo sortovogo prokata iz nepreryvnyh zagotovok* [Influence of the deformation value on the quality of long products from continuously cast billets]. *Bjulleten' CNIITJeIChM* [Bulletin TsNIITEICHM]. 1966, no. 2 (526), pp. 36–37. (in Russian).
14. Jengel'man V., Foss H. and Kol'p R. *Obrabatyvaemost' davleniem zagotovok nepreryvnoj razlivki* [Pressure machinability of continuous casting billets]. *Chjornye metally* [Chernye Metally]. 1967, no. 17, pp. 27–34. (in Russian).
15. Poljakov V.V., Kann Ju.E., Martynov O.V. and oth. *Kachestvo sortovogo prokata iz nepreryvnyh zagotovok* [Quality of long products from continuous cast billets]. *Bjulleten' CNIITJeIChM* [Bulletin TsNIITEICHM]. 1967, no. 15 (563), pp. 53–54. (in Russian).
16. Podvincev A.D., Chizhikov A.I., Zebzeev F. D. and oth. *Kachestvo prokata i shtampovannyh izdelij iz nepreryvnyh slitkov krupnogo sechenija* [The quality of rolled products and stamped products from continuous ingots of large section]. *Problemy stal'nogo slitka : trudy III konferencii po slitku* [Problems of steel ingot: proceedings of the III conference on the ingot]. *Metallurgija* [Metallurgy].–Moscow, 1969, pp. 384–386. (in Russian).
17. Kiss E. *Walztechnische Probleme bei der Warmumformung von Stranggubknüppeln*. Neue Hutte. 1974, no. 2, pp. 77–82.
18. Ushijima K. Working process and resulting properties of continuously casting steel. *Transactions of The Iron and Steel Institute of Japan*. 1975, vol. 15, no. 7, pp. 380–392.
19. Pastrnjak Z. *Prokatka nepreryvnyh zagotovok* [Rolling of continuously cast billets]. *Obzor po sisteme «Informstal'»* [Overview on the Informstal system]. 1983, no. 3 (152), 35 p. (in Russian).
20. Revtov N.I. *Vlijanie stepeni deformacii pri prokatke na strukturu i svojstva nepreryvnolitoj zagotovki* [Influence of the degree of deformation during rolling on the structure and properties of a continuously cast billet] *Izvestija VUZov. Chjornaja metallurgija*. [Izvestiya VUZov. Ferrous metallurgy]. 1986, no. 8, pp. 55–58. (in Russian).
21. Liberman L.A., Dubrovin I.V., Talanov I.I. and oth. *Minimal'noe obzhatie nepreryvnyh zagotovok dlja poluchenija kachestvennogo prokata* [Minimum reduction of continuously cast billets to obtain high-quality rolled products]. *Metallurgija* [Metallurgy]. 1993, no. 4, pp. 31–34. (in Russian).
22. Rudskoj A.I., Lunjov V.A., Shheglova E.G. and oth. *Povedenie defektov makro- i mikrostruktury nepreryvnolitoj zagotovki pri sortovoj prokatke* [Behavior of defects in the macro- and microstructure of a continuously cast billet during section rolling]. *Metalloobrabotka* [Metalworking]. 2006, no. 4 (34), pp. 52–54. (in Russian).
23. Rudskoj A.I. and Lunjov V.A. *Teorija i tehnologija prokatnogo proizvodstva [Tekst]: ucheb. posob.* [Theory and technology of rolling production [Text]: textbook. Manual]. *Nauka* [Science]. Saint-Petersburg, 2008, 527 p. (in Russian).
24. Smirnov E.M., Belevitin V.O., Ignatov R.S. and oth. *K pitannju shhodo vplivu sumarnoi vitjazhki na zminu mezhi plinu stali 45 pri prokatci bezperevnyh zagotovok v persih prohodah* [On the question of the influence of the total extract on the change in the flow limit of steel 45 during rolling of continuous billets in the first passes]. *Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «HPI»: zbirnik naukovih prac': tematičnij vipusk: Novi rishennja v suchasnih tehnologijah* [Bulletin of the National Technical University “KhPI”: coll. of scient. Works. Thematic issue: New solutions in modern technologies]. Kharkiv : NTU «HPI», 2011, no. 47, pp. 92–97. (in Ukrainian).

25. Smirnov E.N., Serov A.I., Skljar V.A., Dombrovskij E.O. and Smirnov O.E. *Issledovanie makrostruktury sortovoj nepreryvnolitoj zagotovki i povedenija defektov ejo osevoj zony vo vremja prokatki* [Investigation of the macrostructure of continuous-cast billet and the behavior of defects in its axial zone during rolling]. *Visnik NTU «HPI»* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. 2015, no. 47 (1166), pp. 57–61. (in Russian).
26. Badjuk S.I. and Vorobej S.A. *Vybor razmera poperechnogo sechenija nepreryvnolitoj zagotovki dlja proizvodstva sortovogo prokata* [Selection of the size of the cross-section of a continuously cast billet for the production of long products]. *Obrabotka metallov davleniem* [Processing of metals by pressure]. 2013, no. 2 (35), pp. 181–187. (in Russian).
27. Smirnov E.N., Mit'ev A.P., Grigor'ev M.V. and oth. *Razvitie metodologii fizicheskogo modelirovanija povedenija osevoj usadochnoj rakoviny i poristosti* [Development of the methodology for physical modeling of the behavior of the axial shrinkage cavity and porosity]. *Naukovi praci DonNTU. Serija: Metalurgija* [Scientific works of DonNTU. Series: Metallurgy] Donetsk : DonGTU, 2002, no. 40, pp. 133–139. (in Russian).
28. Podberjoznyj N.P., Maksimenko O.P., Brodskij S.S. and oth. *Osobennosti izmenenija svojstv listov, prokatyvaemyh iz nepreryvnolitoj zagotovki* [Peculiarities of changing the properties of sheets rolled from continuously cast billets]. *Metall i lit'jo Ukrainy* [Metal and casting of Ukraine]. 1998, no. 5–6, pp. 52–54. (in Russian).
29. Konstantinov D.V. and Korchunov A.G. *Mul'timasshtabnoe komp'yuternoe modelirovanie processov obrabotki metallov davleniem* [Multiscale computer modeling of metal forming processes]. *Vestnik MGTU im. I. G. Nosova* [Vestnik MGTU im. I. G. Nosova]. 2015, no. 1, pp. 36–43. (in Russian).
30. Vorobej S.A. *Prognozirovanie razmera zjoren austenita pri gorjachej deformacii stali* [Prediction of the size of grains of austenite during hot deformation of steel]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy chjornoj metallurgii : sb. nauchn. trudov* [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy: collection of articles. scientific. works]. Dnipropetrovsk : Vizion Publ., 2008, no. 18, pp. 222–232. (in Russian).
31. HE Wen-wu, LIU Jian-sheng, CHEN Hui-qui and GUO Hui-guang Simulation and analysis on microstructure evolution of large generator retaining ring during multi-fire forging. *Advanced Materials Research*. 2010, no. 97–101, pp. 176–181.
32. Duan Xing-Wang, Chen Hui-Qui and Liu Jian-Sheng Microstructure evolution of multi-heat forging and numerical simulation for 316LN steel. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2014, no. 7 (5), pp. 1012–1016.
33. Zhaoyang Jin, Kai Yin, Kai Yan, Defeng Wu, Juan Liu and Zhenshan Cui Finite element modeling on microstructure evolution during multi-pass hot compression for AZ31 alloys using incremental method. *Journal of Material Science & Technology*. 2017, no. 33, pp. 1255–1262.
34. Levchenko G.V., Djomina E.G., Vorobej S.A., Nefed'eva E.E. and Medinskij G. A. *Ocenka deformirovannogo sostojanija metalla po izmeneniju parametrov dendritnoj struktury* [Assessment of the deformed state of metal by changing the parameters of the dendritic structure]. *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyslennost'* [Metallurgical and mining industry]. 2009, no. 5, pp. 71–75. (in Russian).
35. Djomina E.G. *Metod opredelenija stepeni nakoplennoj deformacii v trubnyh i koljosnyh zagotovkah po izmeneniju plotnosti «sledov» dendritnoj struktury* [Method for determining the degree of accumulated deformation in pipe and wheel workpieces by changing the density of "traces" of the dendritic structure]. *Nauka i metalurgija. Elektronne vidannja zbirki naukovih prac'* [Science and metallurgy. Electronic edition of the collection of scientific works]. Dnipro, 2017, no. 1, pp. 44–61. (in Russian).
36. Djomina E.G., Dement'eva Zh.A., Mirgorodskaja A.S. and Gunchenko D.V. *Analiz prorabatyvaemosti struktury stali 09G2S v processe gorjachej prokatki nepreryvnolitoj zagotovki* [Analysis of the workability of the structure of 09G2S steel in the process of hot rolling of a continuously cast billet]. *Nauka i metalurgija : elektronne vidannja zbirki naukovih prac'* [Science and Metallurgy : electronic edition of the collection of scientific works]. Dnipro, 2018, no. 2, pp. 4–18. URL : <http://isi.gov.ua/wp-content/uploads/2018/09/zbirka-statej.pdf>. (in Russian).
37. Saltykov S. A. *Stereometricheskaja metallografija* [Stereometric metallography]. *Metallurgija* [Metallurgy]. Moscow, 1976, 271 p. (in Russian).

Надійшла до редакції: 03.10.2020.