

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 629.4.027.11:669.14.017

О. І. БАБАЧЕНКО¹, Т. В. БАЛАХАНОВА², О. А. САФРОНОВА^{3*}, Г. А. КОНОНЕНКО⁴,
К. Г. ДЬОМІНА⁵

¹Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Ак. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Дніпро, Україна, тел.+38 (056) 790 05 14, e-mail A_Babachenko@i.ua, ORCID 0000-0003-4710-0343

²Відділ термічної обробки металу для машинобудування, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Ак. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Дніпро, Україна, тел.+38 (056) 790 05 14, e-mail tatja.balakhanova@gmail.com, ORCID 0000-0003-2493-218X

^{3*}Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Ак. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Дніпро, Україна, тел.+38 (056) 790 05 14, e-mail safronovaaa77@gmail.com, ORCID 0000-0002-4032-4275

⁴Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Ак. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Дніпро, Україна, тел.+38 (056) 790 05 14, e-mail perlit@ua.fm, ORCID 0000-0001-7446-4105

⁵Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Ак. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Дніпро, Україна, тел.+38 (056) 790 05 14, e-mail katya20@ua.fm, ORCID 0000-0001-9668-8169

Вплив методів гарячого деформування на пророблюваність металу за перерізом під час виробництва осьових заготовок

Мета. У роботі передбачено визначити вплив різних технологій виробництва чорнових залізничних осей із вуглецевої сталі марки F на особливості пророблення структури за перерізом для підвищення якості виготовлення залізничних осей на вітчизняних підприємствах. **Методика.** Проаналізовано чотири технології виготовлення чорнових залізничних осей. Особливість дослідження полягала в тому, що технології відрізнялися тільки схемою деформування. При цьому розміри вихідних безперервнолитих заготовок та отриманих із них чорнових осей були однакові для всіх режимів деформації. Хімічний склад і температури деформації також не відрізнялись. Як основну металографічну характеристику, що дозволяє оцінити ступінь деформаційного пророблення чорнових осей за перерізом, було взято щільність слідів дендритної структури. Аналіз проведено на темплетях, вирізаних із кожного перерізу осі. Пророблення металу оцінено за трансформацією слідів дендритної структури (ліквацийних ділянок). Дендритну структуру, а саме її щільність, визначено як кількість дендритів на 1 мм² площі шліфа, а для точного розрахунку розміру дендрита заміри здійснено мінімум по двох осях овала – великій і малій. **Результати.** Показано, що попри значний ступінь вкочування осьових заготовок із вуглецевої сталі під час застосування різних схем деформування їх пророблення за перерізом суттєво відрізняється. Визначено найбільш ефективну технологію виготовлення чорнових залізничних осей із вуглецевої сталі марки F із точки зору пророблення за перерізом прокату та оцінено вплив кожного з досліджених способів деформації. Установлено найбільший і найменший коефіцієнти пророблюваності осьової заготовки в разі застосування різних методів деформаційного впливу. **Наукова новизна.** Виявлено технологію виготовлення чорнових залізничних осей, яка забезпечує найбільш рівномірне пророблення прокату за перерізом. **Практична значимість.** Визначення коефіцієнта пророблюваності необхідне для кількісної оцінки впливу гарячої деформації та встановлення закономірності формування щільності дендритних слідів у напрямку від поверхневих до центральних шарів заготовки.

Ключові слова: залізнична вісь; деформаційне пророблення; безперервнолита заготовка (БЛЗ); мікроструктура; дендритна структура; коефіцієнт витяжки

Вступ

Удосконалення технології виробництва та якості залізничних осей, попри столітній досвід проведених робіт, не втрачає своєї актуальності. На вітчизняних підприємствах проводять роботи як із підвищення якості осевого металу, так і з оптимізації технологічних схем виробництва готових осей.

Найчастіше основним показником розробки маршрутних схем виробництва металопрокату є нормування браку, зниження витрати металу і трудовитрат під час прокатки і, звичайно ж, обов'язкове дотримання вимог відповідної нормативної документації.

Як показує досвід виробництва [3–4], вимоги за механічними властивостями, хімічним складом, середнім параметрам мікроструктури, як правило, виконують. Основний відсоток браку припадає на наявність внутрішніх дефектів, які виявляють за допомогою ультразвукової діагностики і контролю макроструктури, якості поверхні і, в дещо меншій мірі, однорідності мікроструктури [15, 18]. Усі ці властивості перебувають у прямому зв'язку із сумарним обтисненням металу в процесі деформації та залежать від вихідної якості зливок [2, 5].

Істотне підвищення якості поверхні прокату й зниження витрат металу було реалізовано під час переходу від зливок, відлитих у виливниці, до безперервного відливання заготовок однак у цьому разі ще більш актуальним є питання поліпшення якісних характеристик макроструктури. Адже, незважаючи на нижчу бальність дефектів безперервнолитого металу (що зумовлено геометрією, швидкістю твердіння та зовнішнім впливом на формування безперервнолитих заготовок (БЛЗ) під час кристалізації), важливу роль відіграє не тільки ступінь ущільнення металу, але й рівномірність пророблення структури за перерізом прокату [4–6, 13, 16–17].

Здебільшого під поняттям пророблення розуміють зміну щільності металу, яка найчастіше визначає якість макроструктури. Наприклад, у роботі [9] автори застосовують лише такий показник, як коефіцієнт витяжки. Проте пророблення, або пророблюваність, – це насамперед роздроблення первинної дендритної структури

литого металу в процесі деформації початкового зливка [11–12].

Поліпшення пророблення металу заготовки під час гарячої пластичної деформації сприяє не тільки «заварюванню» деяких внутрішніх дефектів, а й формуванню сприятливого фону хімічної неоднорідності, який після проведення термічної обробки забезпечує однорідну й дрібнозернисту мікроструктуру вуглецевої сталі [7, 11, 14].

Знання про проникнення деформації стиснення дозволить визначити оптимальний режим виготовлення залізничних осей.

Мета

У роботі передбачено провести аналітичні дослідження різних деформаційних способів виготовлення чорнових залізничних осей і встановити, за якої зі схем досягається найкраща деформаційна пророблюваність за перерізом прокату.

Методика

У ході дослідження розглянуто чотири способи деформування залізничних осей. Унікальність цього експерименту полягала в тому, що розміри вихідних БЛЗ Ø 470 мм та отриманих із них осевих заготовок (ОЗ) Ø 260 мм були однакові для всіх режимів деформації. Це дозволило оцінити вплив кожного з досліджених способів деформування на пророблення перерізу деформованих осевих заготовок.

Хімічний склад усіх залучених для роботи плавок осевої сталі марки F наведено в табл. 1.

Аналіз темплетів осевих заготовок показав, що їх макроструктура в розглянутому перерізі є щільною та однорідною будову й має низький рівень осевої ліквациї. Ступінь розвитку осевої ліквациї (шкала 2 СОУ МПП 77.040–191: 2007) складає не більше одного бала в поперечному та поздовжньому темплетях. Тобто параметри осевої ліквациї залишилися незмінними. Не спостерігаються такі дефекти макроструктури, як центральна пористість (усадні раковини) й надмірна ліквация. Слід зауважити, що ці дефекти є неприпустимими згідно з вимогами стандарту ААР М 101.

Таблиця 1

Хімічний склад досліджуваних плавок сталі марки F

Table 1

Chemical composition of the studied heats of F steel grade

№ плавки	Вміст елементів, % мас.												
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Ti	V	[H] ppm
1	0,48	0,66	0,20	0,014	0,004	0,09	–	0,08	0,018		–	0,040	1,35
3	0,49	0,84	0,20	0,010	0,002	0,09	–	0,12	0,024	0,170	–	0,040	1,54
2	0,50	0,80	0,19	0,011	0,001	0,10	≤ 0,010	0,10	0,028	0,150	≤ 0,005	≤ 0,005	–
Сталь марки F	Вимоги AAR M – 101												
	0,45	0,70	min	max	max	–	–	–	–	–	–	–	–
	– 0,59	– 1,00	0,15	0,045	0,050	–	–	–	–	–	–	–	–

Для отримання чорної осі (осьової заготовки) Ø 260 мм деформацію вихідної БЛЗ Ø 470 мм здійснювали за різними способами. Інформація щодо обладнання, способів деформування та застосованих режимів, наведена в табл. 2.

Для визначення пророблення металу за перерізом прокату було використано оцінювання пророблення осьових заготовок за трансформацією слідів дендритної структури [1, 12], яка набуває все більшої популярності. Переваги цієї методики цілком очевидні – відносна простота виготовлення зразків. Для виявлення структури було застосовано гарячий розчин пікрату натрію, адаптований до складу вуглецевих сталей. На наш погляд, він більш чітко дозволяє виявити первинну структуру середньовуглецевої осьової сталі, ніж його аналоги [10, 12]. Металографічний аналіз виконано на світловому мікроскопі «Axiovert 200 M MAT» виробництва фірми «Carl Zeiss». Підрахунок розмірів ділянок попередньої дендритної структури виконано методом вимірювання довжин хорд у програмі «AxioVision 4.6.3» в напівавтоматичному режимі.

Автори роботи під час аналізу дендритної структури пропонують оперувати не поняттям «лінійні елементи», а «площинні фігури», тобто щільність дендритної структури визначати як кількість дендритів N , зосереджених на 1 мм² площі шліфа металографічного зразка. Із кожного перерізу відбирали 6 зразків, які на рівномірній відстані один від одного дозволили охопити весь переріз безперервнолитих та осьових заготовок (від поверхні до центру).

Попри те, що в мікроструктурі досліджуваної БЛЗ і в поздовжньому, і в поперечному перерізі дендритні осі мають форму овала (рис. 1), для спрощення методики аналізу за форму дендритної осі в будь-якому перерізі БЛЗ і в поперечному перерізі прокату взято коло. Для точного визначення розміру дендриту D заміри його осі потрібно виконувати мінімум по двох (великій і малій) осях овала. На цьому етапі й надалі середній розмір дендритної структури D взято як суму середніх розмірів дендритної осі 1 або 2-го порядку (ділянок без видимої ліквіації) й міждендритного простору (ліквіаційної ділянки).

Маркування та опис зразків безперервнолитих осьових заготовок

Marking and description of samples of continuously cast axle billets

№ способу деформування осьової заготовки	№ плавки	Розмір заготовки. Спосіб гарячої деформації. Обладнання. Підприємство
–	1	БЛЗ Ø 470 мм. Розливання сталі на криволінійно-радіальній МБЛЗ № 2 (базовий радіус – 12 метрів) та одержання литої заготовки Ø 470 мм. ТОВ «МЗ» ДНІПРОСТАЛЬ»
1	1	Осьова заготовка Ø 260 мм. Поздовжня прокатка на пілігримовому стані № 2 ТПА 5 – 12" в ТПЦ № 4. Маршрут: Ø 470 → Ø 260 мм. ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ»
2	3	Осьова заготовка Ø 260 мм. Протягання в комбінованих бойках (верхній плоский, нижній вирізний) на пресі зусиллям 20 МН. Маршрут: Ø 470 → Ø 350 → Ø 260 мм. ТОВ «ДНІПРОПРЕС СТАЛЬ»
3	2	Осьова заготовка Ø 260 мм. Поздовжня прокатка на ТЗС900/750–3 в прокатному цеху. Маршрут у кліті 900: Ø 470 → Ø 260 мм, 13 проходів. ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат»
4	2	Осьова заготовка Ø 260 мм. Вільне кування на плоских бойках по всій довжині заготовки, режим № 2 – $\Delta h = 40 - 45$ мм, 5 кантувань / поворотів. Молот кувальний пароповітряний 3 150 кг (0,031 МН). Маршрут: Ø 470 → Ø 260 мм. Ремонтно-механічний цех (РМЦ) ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ»

Щільність дендритної структури N сталі марки F у напрямку від поверхневих до центральних шарів БЛЗ зменшується в 7,2 раза, без урахування значень щільності дендритів у вузькій кірковій зоні. Таким чином, у разі зниження інтенсивності тепловідведення збільшується середній розмір дендритів. Далі в роботі саме щільність слідів дендритної структури, у зв'язку зі своєю інформативністю, використано як основну металографічну характеристику, що дозволяє оцінити ступінь деформаційного пророблення сталі. Середня за зразками заготовки щільність дендритної структури розрахована без розгляду її значення в поверхневій зоні мінімальних рівновісних дендритів або зростання наявних дендритів з осями вищого, ніж 1 і 2-ий, порядків.

Результати

Об'ємна частка ліквіційних ділянок (попередніх міждендритних просторів) у міру просування від поверхні до центральної частини за-

готовки, що складається з великих рівновісних дендритів, збільшується від 20,0 до 30,0 %. Але поблизу теплового центра БЛЗ спостерігається різке зменшення кількості ліквіційних ділянок (рис. 1, d , e), що безпосередньо пов'язано з особливостями протікання процесу об'ємної кристалізації, зокрема з термодинамічними умовами її затвердіння.

Для отримання картини розподілу деформації по перерізу осьових заготовок Ø 260 мм проаналізуємо, як після гарячої прокатки та вільного кування змінилася щільність слідів дендритної структури. Як було сказано вище, під час розробки методу оцінки деформованого стану металу найінформативнішим показником змін, яких дендритна структура зазнає в разі впливу різних факторів, є щільність її слідів.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

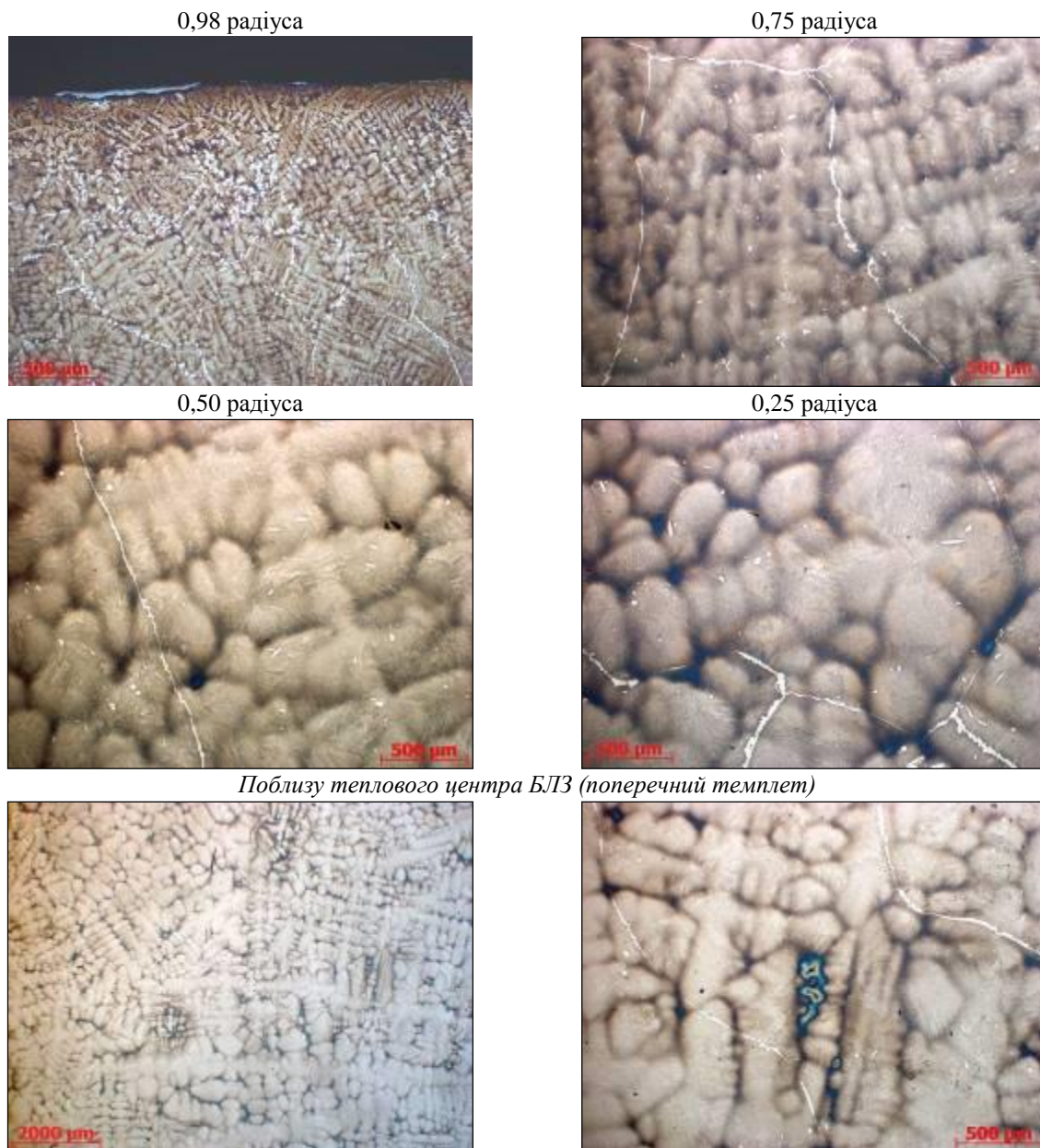


Рис. 1. Сліди дендритної структури в зразках вихідної БЛЗ Ø 470 мм, плавка № 1

Fig. 1. Traces of dendritic structure in samples of the original continuously cast billet Ø 470 mm, heat no. 1

На рис. 2 наведено фото структури кожного шару зразків БЛЗ Ø 470 мм (до деформації) та осьових заготовок Ø 260 мм (після деформації) зі слідами дендритної структури. Помітно, що після прокатки й кування тенденція зміни як виду дендритів (дрібні рівновісні, стовпчасті, великі рівновісні), так і щільності слів попередньої дендритної структури за перерізом деформованих заготовок аналогічна характеру її

зміни в поперечному перерізі литої заготовки до деформування. У міру віддалення від поверхні до центра заготовки щільність слів дендритної структури зменшується. Розглянемо, яких змін зазнала дендритна структура сталі марки F за різних способів гарячої деформації БЛЗ Ø 470 мм. Найпомітніші сліди дендритної структури в мікроструктурі вуглецевої сталі марки F до і після деформації показані на рис. 2.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

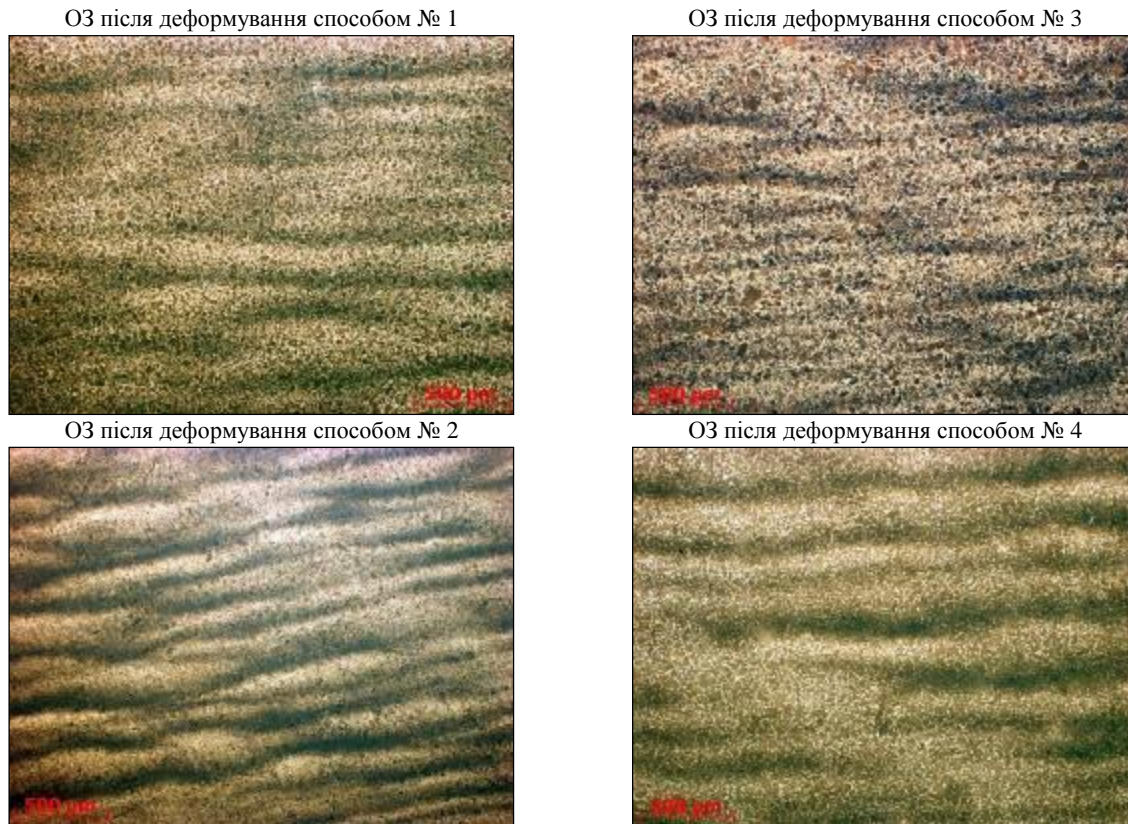


Рис. 2. Сліди попередньої дендритної структури у зразках, вирізаних на відстані $\frac{1}{2}$ радіуса осової заготовки $\varnothing 260$ мм, $\times 50$

Fig. 2. Traces of the previous dendritic structure in the samples cut at a distance $\frac{1}{2}$ of the radius of the axle billet $\varnothing 260$ mm $\times 50$

Для кількісної оцінки впливу гарячої деформації на щільність слідів дендритної структури визначена величина її ущільнення C (від англ. *compaction* – ущільнення, стиснення, пресування):

$$C = \frac{N_2}{N_1},$$

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

На нашу думку, цей параметр характеризує, як у процесі прокатки й протягання відбувається природна витяжка кожного аналізованого шару заготовки і наскільки її величина відрізняється від коефіцієнта фактичної витяжки λ . Зміна ущільнення слідів дендритної структури за перерізом усіх досліджуваних заготовок має

однаковий характер: у міру віддалення від поверхні заготовки його значення збільшуються, досягають максимальних значень на відстані $\frac{1}{2}$ радіуса (після протягання на пресі – на відстані $\frac{3}{4}$ радіуса заготовки) та зменшуються в центральних шарах.

У роботах [14, 15] за критерій оцінки методу визначення пророблюваності структури взято коефіцієнт витяжки λ – відношення площі поперечного перерізу заготовки до і після прокатки. Для встановлення залежності ущільнення структури в процесі деформації від величини фактичної витяжки запропонований коефіцієнт пророблюваності слідів дендритної структури K , який визначають за формулою:

$$K = 1 - \delta_\lambda,$$

де δ_λ – відхилення значення ущільнення слідів дендритної структури щодо коефіцієнта витяжки λ .

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Якщо $K < 1$, то структура металу в цих шарах заготовки не зазнає особливого деформаційного впливу. Якщо $K > 1$, то структура металу заготовки в таких мікробсягах перебуває в зоні інтенсивної пластичної деформації. Отримані результати цілком узгоджуються з описом розподілу зон деформації в її осередку під час прокатки «високих» тіл [8]. Очевидно, що мала деформація ϵ і, як наслідок, мале ущільнення слідів дрібних дендритних кристалів у поверхневому шарі – це наслідок наявності зони прилипання, вузької області утрудненої деформації під час контакту поверхні заготовки з прокатними валками.

Зміна коефіцієнта пророблюваності структури K за перерізом осьової заготовки після протягання в комбінованих бойках на гідравлічному пресі зусиллям 20 МН показує, що в зоні інтенсивної пластичної деформації структура пророблена краще, ніж в аналогічних шарах ОЗ після прокатки на пілігримових станах. Але для ОЗ, отриманих куванням, зона інтенсивної пластичної деформації зосереджена на відстані від 75 до 50 % радіуса заготовки.

За результатами аналізу макроструктури та слідів дендритної структури можна зробити висновок, що режим деформування заготовки, реалізований в умовах ТОВ «ДНІПРОПРЕС СТАЛЬ» під час протягання в комбінованих бойках преса 20 МН (2 000 тонн), дозволяє досягати максимального пророблення на певній глибині кування. Але, як зазначає низка дослідників, деформування круглої заготовки в нижньому кутовому (вирізнному) й верхньому плоскому бойках є одним із найбільш раціональних варіантів процесу кування, оскільки його застосування знижує ймовірність утворення осьових тріщин, підвищує інтенсивність процесу протягання, величину подачі металу в бойки й величину вковування λ . Варіацією технологічних параметрів процесу протягання в комбінованих бойках (кут вирізу бойка й кут кантування, величина відносної подачі і відносного обтискання та ін.) можна досягти рівномірного пророблення металу по перерізу поковки. Загалом розглянутий у цій роботі варіант протягання початкової литої заготовки за маршрутом $\varnothing 470 \rightarrow \varnothing 350 \rightarrow \varnothing 260$ мм забезпечив серед-

ній за перерізом коефіцієнт пророблюваності структури $K = 0,64$. Таке пророблення металу в процесі гарячої деформації осьової заготовки є слабшим порівняно з поздовжньою прокаткою на трубозаготівельному стані ТЗС 900 / 750 – 3 (середній за перерізом коефіцієнт пророблюваності структури $K = 0,99$) і на пілігримовому стані № 2 ТПА 5 – 12" (середній за перерізом коефіцієнт пророблюваності структури $K = 0,89$). Але водночас коефіцієнт пророблюваності структури $K = 0,64$ – це найкращий результат під час отримання осьових заготовок методом кування.

Зіставлення значень коефіцієнта пророблюваності структури K осьових заготовок, отриманих протяганням у комбінованих бойках та методом вільного кування в напрямку від центра до поверхні, починаючи від 50 % радіуса, дозволяє стверджувати, що краще пророблення цієї частини ОЗ відбувається під час протягання на пресі. Так, значення коефіцієнта K на відстані 50, 75, 90 і 98 % радіуса ОЗ після протягання на пресі більше ніж в ОЗ після вільного кування відповідно (точки 1–4 на рис. 3).

Імовірно, у центральних шарах дія стискальних напружень слабшає, і макропластична деформація реалізується в основному за рахунок витягування заготовки в осьовому напрямку.

Зміну коефіцієнта пророблюваності K слідів дендритної структури вуглецевої сталі марки F за перерізом осьових заготовок $\varnothing 260$ мм показано на графіках (рис. 3). Зазначені графіки демонструють, що зона інтенсивної пластичної деформації поширюється від поверхні до середини радіуса заготовок. Можна вважати, що центральні шари заготовок у процесі поздовжньої прокатки й протягання не зазнали особливого деформаційного впливу і, як наслідок, виявилися недостатньо «проробленими».

Наукова новизна та практична значимість

У роботі проаналізовано чотири способи деформації залізничних осей і встановлено, що в разі поздовжньої прокатки на трубозаготівельному стані ТЗС 900 / 750 – 3 за дослідним режимом деформації досягається найбільший коефіцієнт пророблюваності за перерізом осьової заготовки.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

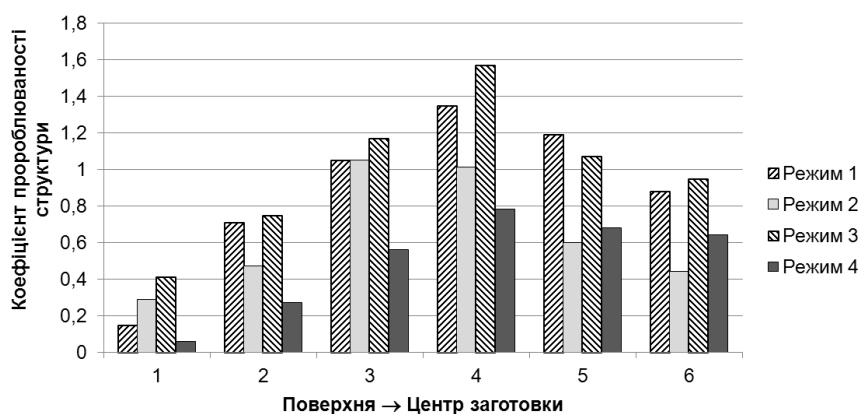


Рис. 3. Зміна коефіцієнта пророблюваності структури за перерізом осьових заготовок Ø 260 мм зі сталі марки F

Fig. 3. Change in the structure workability coefficient on the cross section of the axial billets Ø 260 mm of F steel grade

Висновки

1. Розглянуто вплив технології виробництва на особливості структури всього перерізу чорнових осей із вуглецевої сталі марки F, виготовлених відповідно до вимог стандарту ААР М – 101. Установлено закономірність формування дендритної структури за перерізом досліджуваної БЛЗ Ø 470 мм. Середня товщина дендритних гілок у напрямку від поверхні до центральних шарів БЛЗ змінюється від 50,0 до 370,0 мкм.

2. Установлено, що щільність слідів дендритної структури сталі марки F в напрямку від поверхневих до центральних шарів БЛЗ Ø 470 мм без урахування значень щільності дендритів у вузькій кірковій зоні зменшується в 7,2 раза. Таким чином, щільність слідів дендритів у напрямку від поверхні до центра БЛЗ повною мірою визначає характер зміни інтенсивності тепловідведення.

3. З'ясовано, що найкраща пророблюваність структури початкової литої заготовки Ø 470 мм була досягнута в процесі поздовжньої прокатки на трубозаготівельному стані ТЗС 900 / 750 – 3 за дослідним режимом деформації. Середній за перерізом коефіцієнт пророблюваності структури $K = 0,99$. Поздовжня прокатка на пілігримовому стані № 2 ТПА 5 – 12" за один прохід із використанням нового овального калібрування робочої частини прокатних валків забезпечила пророблюваність структури вуглецевої сталі марки F на рівні $K = 0,89$. Протягання на гідравлічному пресі зусиллям 20 МН (2 000 тонн) за два проходи – на рівні $K = 0,64$. І нарешті, найнижче значення $K = 0,32$ – середній за перерізом осьової заготовки Ø 260 мм коефіцієнт пророблюваності структури вуглецевої сталі марки F – отримано в результаті кування вихідної литої заготовки Ø 470 мм на пароповітряному молоті зусиллям 0,031 МН (3,150 тонн).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Левченко Г. В., Дєміна Е. Г., Воробей С. А., Нефедьєва Е. Е., Мединский Г. А. Оценка деформированного состояния металла по изменению параметров дендритной структуры. *Металлургическая и горно-рудная промышленность*. 2009. № 5. С. 72–75.
2. Паламар Д. Г., Воробей С. О., Раздобреєв В. Г., Балаханова Т. В. Дослідження нерівномірності механічних властивостей по перерізу безперервнолитих заготовок. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2018. № 32. С. 250–258.
DOI: <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2018-32-250-258>

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

3. Панченко А. И., Кийко С. Г., Гасик М. И., Сальников А. С., Левченко Г. В., Горобец А. П., Клинич Ю. В. Современные технологии выплавки и разливки стали EА1N для производства железнодорожных осей. *Современная электрометаллургия*. 2019. № 2. С. 35–42.
DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2019.02.06>
4. Петренко Ю. П., Мюнх В. Ф., Богатов А. А., Витькин Д. А. Анализ влияния технологических схем деформации на качество осевого металла ОАО НТМК. *Металлург*. 2009. № 10. С. 181–187.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-010-9224-2>
5. Правосудович В. В., Сокурено В. П., Данченко В. Н., Кондратьев С. В., Ключник Ю. А., Панюшкин Е. Н. *Дефекты стальных слитков и проката* : справочное издание. Москва : Интермет Инжиниринг, 2006. 384 с.
6. Снитко С. А., Яковченко А. В., Сотников А. Л. Влияние схем штамповки колесных заготовок на силовые режимы работы формовочного прессы и износ инструмента деформации. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2018. № 61 (5). С. 385–392. DOI: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-5-385-392>
7. *Способ исследования течения металла при горячей объемной штамповке изделий*: пат. 2506138С2 РФ: МПК В21J 5/02 (2006.01) G01N 3/28. № 2012113089; заявл. 03.04.2012; опубл. 10.02.2014, Бюл. № 4.7 с.
8. Тарновский И. Я., Поздеев А. А., Ляшков В. Б. *Деформация металла при прокатке*. Свердловск : Металлургиздат, 1956. 287 с.
9. Энгельман В., Фосс Х., Кольп Р. Обрабатываемость давлением заготовок непрерывной разливки. *Чёрные металлы*. 1967. № 17. С. 27–34.
10. Basso A., Toda-Caraballo I., San-Martín D., Caballero F.G. Influence of cast part size on macro- and microsegregation patterns in a high carbon high silicon steel. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9. Iss. 3. P. 3013–3025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.052>
11. Delgado P., Cuesta I. I., Alegre J. M., Díaz A. State of the art of Deep Rolling. *Precision Engineering*. 2016. Vol. 46. P. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.05.001>
12. Ennis B. L., Jimenez-Melero E., Mostert R., Santillana B., Lee P. D. The role of aluminium in chemical and phase segregation in a TRIP-assisted dual phase steel. *Acta Materialia*. 2016. Vol. 115. P. 132–142.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.05.046>
13. Fonseca L., Faria A. Energy balance approach to analyze crankshaft deep rolling simulation results. *24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering*. 2017. P. 1–9.
DOI: <https://doi.org/10.26678/abcm.cobem2017.cob17-0606>
14. Galkin S. P., Aleschenko A. S., Romantsev B. A., Gamin Yu. V., Iskhakov R. V. Effect of Preliminary Deformation of Continuously Cast Billets by Radial-Shear Rolling on the Structure and Properties of Hot-Rolled Chromium-Containing Steel Pipes. *Metallurgist*. 2021. Vol. 65. Iss. 1–2. P. 185–195.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-021-01147-4>
15. Guanzhen Zh., Ruiming R. Study on typical failure forms and causes of high-speed railway wheels. *Engineering Failure Analysis*. 2019. Vol. 105. P. 1287–1295.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.07.063>
16. Mos'pan V. V., Medinskii G. A., Levchenko G. V., Gritsai T. V., Nefed'eva, E. E. Structure formation in steel 45 for railroad axles at high temperatures. *Steel in Translation*. 2012. Vol. 42. Iss. 7. P. 597–599.
DOI: <https://doi.org/10.3103/s0967091212070066>
17. Yershov S., Levchenko G., Wu K., Zhou W., Rui K. The development of a new deformation regime for microstructure refinement in solid railway axles by hot deformation optimization. *Теорія і практика металургії*. 2020. № 1 (124). P. 5–17. DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.1.2020.01>
18. Zoran O. Analysis of the railway freight car axle fracture. *Procedia Structural Integrity*. 2017. Vol. 4. P. 56–63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.07.009>

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

O. I. BABACHENKO¹, T. V. BALAKHANOVA², O. A. SAFRONOVA^{3*},
H. A. KONONENKO⁴, K. H. DOMINA⁵¹Dep. «Structural Steels' Deformation and Heat Treatment Problems», Iron and Steel Institute named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ak. Starodubova K. F. Sq., 1, 49107, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 790 05 14, e-mail A_Babachenko@i.ua, ORCID 0000-0003-4710-0343²Dep. «Structural Steels' Deformation and Heat Treatment Problems», Iron and Steel Institute named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ak. Starodubova K. F. Sq., 1, 49107, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail tatja.balakhanova@gmail.com, ORCID 0000-0003-2493-218X^{3*}Dep. «Structural Steels' Deformation and Heat Treatment Problems», Iron and Steel Institute named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ak. Starodubova K. F. Sq., 1, 49107, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 790 05 14, e-mail safronovaaa77@gmail.com, ORCID 0000-0002-4032-4275⁴Dep. «Structural Steels' Deformation and Heat Treatment Problems», Iron and Steel Institute named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ak. Starodubova K. F. Sq., 1, 49107, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 790 05 14, e-mail perlit@ua.fm, ORCID 0000-0001-7446-4105⁵Dep. «Structural Steels' Deformation and Heat Treatment Problems», Iron and Steel Institute named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ak. Starodubova K. F. Sq., 1, 49107, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 790 05 14, e-mail katya20@ua.fm, ORCID 0000-0001-9668-8169

Impact of Hot Deformation Methods on Metal Workability along the Section During the Production of Axle Billets

Purpose. The work is aimed to determine the influence of various technologies for the production of rough railroad axles from F grade carbon steel on the workability features along the section in order to improve the quality of railway axles at domestic enterprises. **Methodology.** Four production technologies of the rough railway axles were analyzed. The peculiarity of the study was that the technologies differed only in the deformation pattern. The dimensions of the initial continuously cast billets and the resulting rough axes were the same for all deformation modes. The chemical composition and temperature of deformation also did not differ. The density of traces of the dendritic structure was taken as the main metallographic characteristic, which makes it possible to assess the degree of deformation workability of the rough axes along the section. The analysis was performed on templates cut from each section of the axle. The workability of the metal was assessed by the transformation of traces of the dendritic structure (liquation areas). The dendritic structure, namely its density, was determined as the number of dendrites per 1 mm² of the microsection area, and to accurately calculate the dendrite size, measurements were made at least along two ellipse axes—large and small. **Findings.** It is shown that, despite a significant degree of forging of axle billets made of carbon steel, when using different deformation schemes, their workability along the section differs significantly. The most effective production technology of rough railroad axles from F grade carbon steel has been determined from the point of view of workability along the section of rolled stock, and the impact of each of the investigated deformation methods has been assessed. The largest and the smallest workability coefficients of the axle billet have been established when using various methods of deformation impact. **Originality.** The production technology of rough railway axles has been determined, which ensures the most uniform workability of rolled products along the section. **Practical value.** The workability factor for a quantitative assessment of the effect of hot deformation was determined and the formation pattern of the dendritic traces' density in the direction from the surface to the central layers of the workpiece was established.

Keywords: railway axle; deformation workability; continuously cast billet' microstructure; dendritic structure; elongation ratio

REFERENCES

1. Levchenko, G. V., Dyomina, E. G., Vorobej, S. A., Nefed'eva, E. E., & Medinskij, G. A. (2009). Ocenka deformirovannogo sostojanija metalla po izmeneniju parametrov dendritnoj struktury. *Metallurgical and mining industry*, 5, 72-75. (in Russian)
2. Palamar, D. G., Vorobey, S. A., Razdobreev, V. G., & Balahanova, T. V. (2018). Investigation of the unevenness of mechanical properties along the cross-section of continuously cast billets. *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*, 32, 250-258.
DOI: <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2018-32-250-258> (in Ukrainian)

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

3. Panchenko, A. I., Kijko, S. G., Gasik, M. I., Salnikov, A. S., Levchenko, G. V., Gorobets, A. P., Projdak, Yu. S., & Klimchuk, Yu. V. (2019). Modern technologies of melting and casting of steel EAIN for production of railway axles. *Sovremennââ Elektrometallurgîâ*, 2019(2), 35-42. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2019.02.06> (in Russian)
4. Petrenko, Y. P., Myunkh, V. F., Bogatov, A. A., & Vit'kin, D. A. (2009). Analysis of the effect of deformation scheme on the quality of axle steel at the nizhniy tagil metallurgical combine. *Metallurgist*, 53(9-10), 627-632. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-010-9224-2> (in Russian)
5. Pravosudovich, V. V., Sokurenko, V. P., Danchenko, V. N., Kondrat'ev, S. V., Klyushnik, Yu. A., & Panyushkin, E. N. (2006). *Defekty stalnykh slitkov i prokata: spravochnoe izdanie*. Moscow: Internet Inzhiniring. (in Russian)
6. Snitko, S. A., Yakovchenko, A. V., & Sotnikov, A. L. (2018). Influence of Wheel Billet Stamping Schemes on Power Modes of Forming Press Operation And on Wear of the Deformation Tool. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 61(5), 385-392. DOI: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-5-385-392> (in Russian)
7. Astashchenko, V. I., Ishchenko, V. I., Shveyov, A. I., Shveyova, T. V., Martyugin, V. S., & Mahonin, V. V. (2014). *RU Patent № 2506138 Fyedyeralnaya Sluzhba po Intyellyektualnoy Sobstvyennosti*. (Rospatent)
8. Tarnovskiy, I. Ya., Pozdeev, A. A., & Lyashkov, V. B. (1956). *Deformatsiya metalla pri prokatke*. Sverdlovsk: Metallurgizdat. (in Russian)
9. Jengel'man, V., Foss, H., & Kol'p, R. (1967). Obrabatyvaemost' davleniem zagotovok nepreryvnoj razlivki. *Chjornye metally*, 17, 27-34. (in Russian)
10. Basso, A., Toda-Caraballo, I., San-Martín, D., & Caballero, F. G. (2020). Influence of cast part size on macro- and microsegregation patterns in a high carbon high silicon steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 3013-3025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.052> (in English)
11. Delgado, P., Cuesta, I. I., Alegre, J. M., & Díaz, A. (2016). State of the art of Deep Rolling. *Precision Engineering*, 46, 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.05.001> (in English)
12. Ennis, B. L., Jimenez-Melero, E., Mostert, R., Santillana, B., & Lee, P. D. (2016). The role of aluminium in chemical and phase segregation in a TRIP-assisted dual phase steel. *Acta Materialia*, 115, 132-142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.05.046> (in English)
13. Fonseca, L., & Faria, A. (2017). Energy balance approach to analyze crankshaft deep rolling simulation results. *24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering* (pp. 1-9). DOI: <https://doi.org/10.26678/abcm.cobem2017.cob17-0606> (in English)
14. Galkin, S. P., Aleschenko, A. S., Romantsev, B. A., Gamin, Yu. V., & Iskhakov, R. V. (2021). Effect of Preliminary Deformation of Continuously Cast Billets by Radial-Shear Rolling on the Structure and Properties of Hot-Rolled Chromium-Containing Steel Pipes. *Metallurgist*, 65(1-2), 185-195. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-021-01147-4> (in English)
15. Guanzhen, Zh., & Ruiming, R. (2019). Study on typical failure forms and causes of high-speed railway wheels. *Engineering Failure Analysis*, 105, 1287-1295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.07.063> (in English)
16. Mos'pan, V. V., Medinskii, G. A., Levchenko, G. V., Gritsai, T. V., & Nefed'eva, E. E. (2012). Structure formation in steel 45 for railroad axles at high temperatures. *Steel in Translation*, 42(7), 597-599. DOI: <https://doi.org/10.3103/s0967091212070066> (in English)
17. Yershov, S., Levchenko, G., Wu, K., Zhou, W., & Rui, K. (2020). The development of a new deformation regime for microstructure refinement in solid railway axles by hot deformation optimization. *THEORY AND PRACTICE*, 1(124), 5-17. DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.1.2020.01> (in English)
18. Zoran, O. (2017). Analysis of the railway freight car axle fracture. *Procedia Structural Integrity*, 4, 56-63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.07.009> (in English)

Надійшла до редколегії: 28.05.2021

Прийнята до друку: 30.09.2021