

УДК: 669.017: 621.774: 621.771.2.001.57: 005

**Фролов Я. В.**  
**Дьоміна К. Г.**  
**Андрєєв В. В.**

## **ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНКИ ПРОРОБЛЮВАНOSTІ СТРУКТУРИ СТАЛІ 09Г2С В ПРОЦЕСІ ПОЗДОВЖНЬОЇ ПРОКАТКИ ТРУБНОЇ ЗАГОТОВКИ Ø 250 ММ**

Як відомо, інтенсивне деформаційне пророблення початкової литої заготовки є одним із способів підвищення якості великосортного прокату. Під терміном «пророблення» або «пророблюваність» розуміється дроблення дендритної структури в процесі деформації початкового злитка [1].

Прокатка заготовок круглого перерізу діаметром від 120 мм здійснюється в різноманітних системах сортових калібрів і супроводжується значною нерівномірністю деформації, яка зумовлена формою калібрів і умовами високих осередків деформації. У свою чергу, нерівномірність розподілу деформації по висоті та ширині заготовок призводить до того, що на певній відстані від контактної поверхні зберігаються шари, які не піддаються інтенсивній деформаційній дії, тобто вони є непроробленими [2].

Аналіз зміни ступеня нерівномірності та характеру розподілу деформації в залежності від технологічних параметрів представляє особливий інтерес для вибору раціонального режиму прокатки з метою підвищення її рівномірності в об'ємі заготовки. Надалі це сприятливо позначиться на формуванні структурного стану сталі і, як наслідок, на механічних властивостях та інших показниках якості прокату [3].

Застосування математичного моделювання в обробці металів тиском (ОМТ) істотно скорочує об'єм і спрощує методику експериментальних досліджень процесів гарячої деформації [4–6]. Незважаючи на те, що використання якісної моделі дозволяє отримати попередні дані про формозміни матеріалу, температурні, кінематичні та енергосилові параметри процесу, сучасна методологія проектування технологічних процесів з позиції створення напружено-деформованого стану (НДС), сприятливого для досягнення технологічних цілей, зобов'язана враховувати також перетворення на мікрорівні матеріалу, що обробляється, в парній взаємодії з макрорівнем. Особливо гостро цей нюанс проявляється в процесах ОМТ зі свідомо високим ступенем нерівномірності [7].

Сучасний етап розвитку методів моделювання процесів ОМТ характеризується появою великої кількості робіт, в яких тим чи іншим способом робляться спроби зв'язати особливості будови матеріалів з характером їх деформації [8–11]. В даних роботах авторам вдалося концептуально визначити рівні протікання процесів пластичної деформації і експериментально зв'язати явища локалізації деформації з нерівномірністю розподілу мікроструктурних параметрів. Основним результатом математичного моделювання процесів знеміцнювання сплавів за запропонованими моделями є середній умовний діаметр зерна їх мікроструктури. Це найбільш важлива характеристика мікроструктури, яка емпірично пов'язана з механічними властивостями металів і сплавів. Однак, через протікання ряду 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 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.

Такою особливістю мікроструктури конструкційних сталей є 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 при подальшій температурній і деформаційній дії, незважаючи на значну тривалість процесу нагріву і витримки при високих температурах, але при цьому змінювати свою форму і розміри, заснований розроблений в Інституті чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України метод оцінки деформованого стану металу зі зміни параметрів колишньої дендритної структури [12, 13].

Для подальшого розвитку даного методу представляло інтерес виконати порівняльний аналіз впливу технологічних параметрів гарячої деформації на НДС металу та сліди дендритної структури. Як приклад був обраний процес гарячої деформації безперервнолитої заготовки (БЛЗ) перерізом  $335 \times 400$  мм зі сталі 09Г2С методом поздовжньої прокатки для отримання заготовки з круглим поперечним профілем  $\varnothing 250$  мм на трубозаготівельному стані 900 / 750 – 3 в умовах ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат».

Мета даної роботи полягала в аналізі напружено-деформованого стану металу, який сформувався під час прокатки в останньому, круглому, калібрі кліті 900 трубозаготівельного стану 900 / 750 – 3, та зіставлення результатів математичного моделювання та оцінки пророблюваності структури трубної заготовки  $\varnothing 250$  мм.

Мікроструктура сталі 09Г2С в литому і деформованому стані показана на рис. 1. Вміст основних хімічних елементів в сталі 09Г2С складає: 0,09 С, 1,43 Mn і 0,55 Si (% ваг.). Оскільки принцип роботи запропонованого методу полягає у вимірюванні параметрів колишньої дендритної структури в початковому, литому, і деформованому стані, коротко розглянемо її основні параметри і дамо їх характеристику в мікроструктурі БЛЗ.

Утворену при кристалізації сталі хімічну неоднорідність характеризують такі параметри:

- коефіцієнт розподілу (коефіцієнт дендритної ліквідації) хімічного елементу;
- об'ємна частка сегрегаційних ділянок і ділянок без видимої сегрегації;
- розмір колишніх дендритів;
- щільність колишньої дендритної структури.

В роботі [14] було визначено, що коефіцієнти дендритної ліквідації  $K_d$  кремнію та марганцю в мікроструктурі низьколегованої сталі 09Г2С практично не змінюються протягом усього технологічного процесу виробництва заготовок круглого профілю. В середньому по перерізу БЛЗ  $335 \times 400$  мм і трубної заготовки  $\varnothing 250$  мм значення  $K_d$  і для кремнію, і для марганцю становлять 1,40–1,50. Це стосується і кількості сегрегаційних ділянок і ділянок без видимої сегрегації. У поверхневих шарах обох заготовок вона дорівнює 20 % / 80 %, в центральних шарах – 30 % / 70 %. При цьому в середньому по перерізу і литої, і деформованої заготовки об'ємна частка становить 25 % і 75 % для ліквідаційних мікрооб'ємів і мікрооб'ємів без ліквідації відповідно.

Таким чином, кількісна постійність хімічної неоднорідності (слідів колишньої дендритної структури) дозволила відстежити, як в процесі гарячої деформації змінилися їх форма, розміри і щільність, та на підставі металографічного аналізу зробити висновок про пророблюваність структури в об'ємі трубної заготовки  $\varnothing 250$  мм.

У реальних виробничих умовах ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат» заготовки  $\varnothing 230 - 270$  мм отримують методом поздовжньої прокатки на трубозаготівельному стані ТЗС 900 / 750 – 3 в реверсивній кліті 900 за 5 проходів [15].

Для теоретичного дослідження процесу поздовжньої прокатки заготовки круглого профілю поперечного перерізу зі сталі 09Г2С була створена модель процесу гарячої прокатки в програмному комплексі QForm. Застосування програмного продукту QForm стало можливим завдяки угоді про використання пробної навчальної ліцензії програми QForm 8 між Micas Simulations Limited (м. Оксфорд, Великобританія) та кафедрою обробки металів тиском ім. академіка О. П. Чекмарьова НМетАУ (м. Дніпро, Україна) – agreement No. MSL2015\_10\_5 від 28.10.2015 р.

Реологічні властивості сталі 09Г2С для моделювання були прийняті відповідно до довідкових даних [16]. Температура нагріву початкової заготовки перед прокаткою (1200–1220 °С), початку (1170–1190 °С) та кінця ( $\geq 950$  °С) прокатки обрані згідно з ТІ 230–П 408-06 [17]. Розміри поперечного перерізу початкової заготовки –  $335 \times 400$  мм.

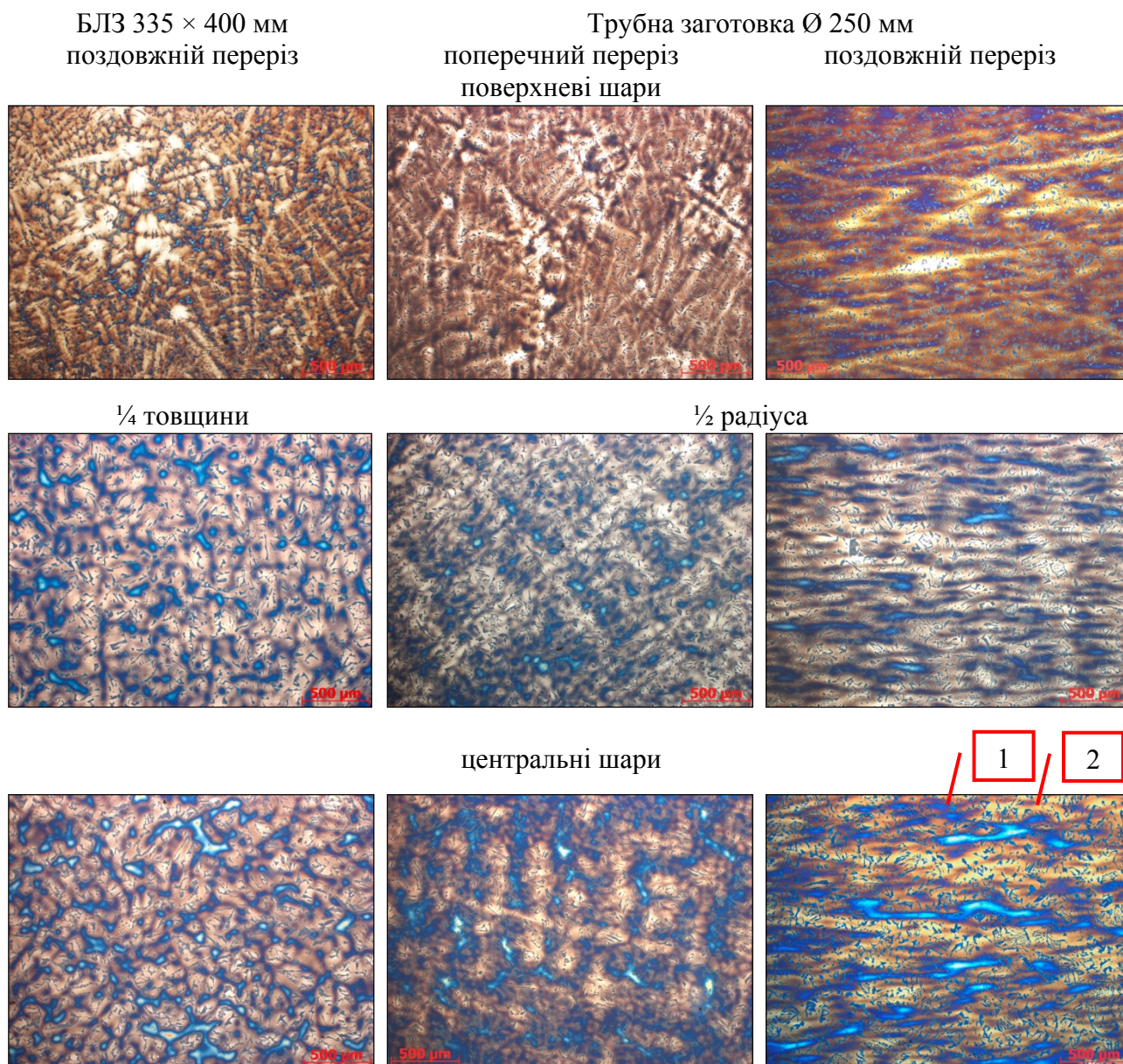


Рис. 1. Зміна слідів дендритної структури по перерізу безперервнолітої і трубної заготовок,  $\times 50$ :

1 – сегрегаційні ділянки; 2 – ділянки без видимої сегрегації

Процес прокатки в високих осередках деформації ( $l/h_{сер.} = 0,5 - 1,0$ ) характеризується вкрай нерівномірним розподілом напружень, ступенів і швидкостей деформації по висоті розкату. Тому його напружено-деформований стан слід розглядати, виділивши в певній площині і в напрямку як мінімум 3 основні зони: приконтактну, проміжну (шари, що знаходяться на відстані  $\sim 1/4$  товщини смуги) і центральну зону.

В даній роботі аналіз напруженого і деформованого стану металу, який сформувався під час прокатки в останньому, круглому, калібрі кліті 900, виконано в поперечному перерізі виходу заготовки з калібру.

На рис. 2, а показана зміна середнього нормального напруження по вертикальній осі в поперечному перерізі заготовки Ø 250 мм. В поверхневих шарах величина розтягуючого напруження досягає 45 МПа. У міру віддалення від поверхні вглиб заготовки вона різко знижується, і на відстані  $\sim 65$  % радіуса заготовки відбувається зміна напруженого стану: середнє нормальне напруження стає стискуючим. При подальшому просуванні до центру заготовки стискуюче напруження збільшується до  $-17$  МПа на відстані 25 % радіуса, а потім знижується до  $-9$  МПа.

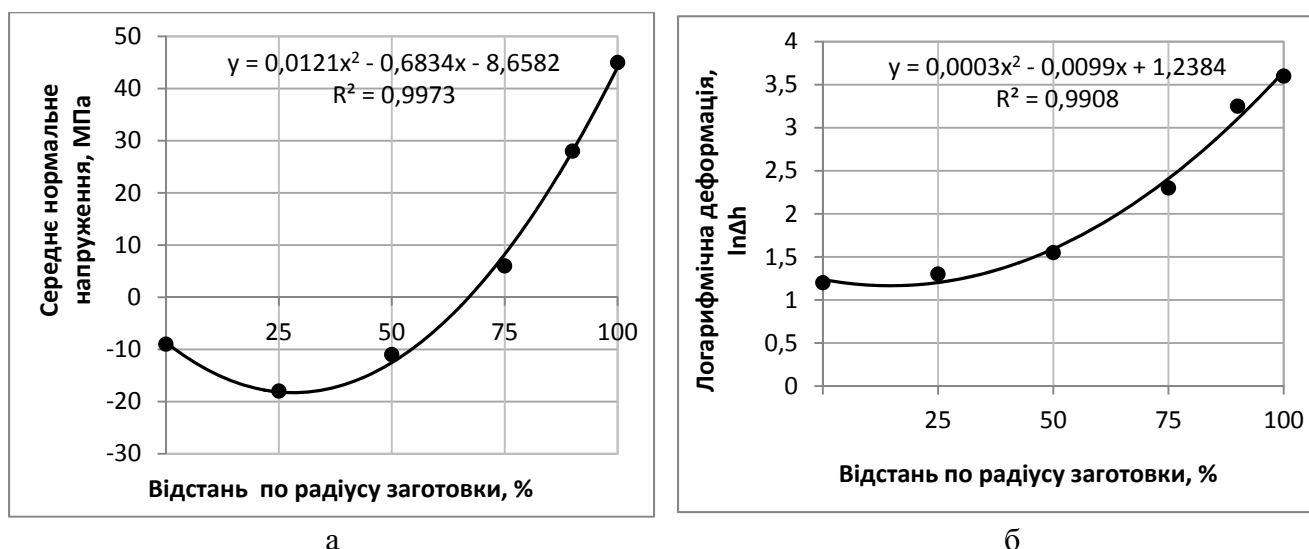


Рис. 2. Зміна середнього нормального напруження (а) і логарифмічної деформації (б) по  $\frac{1}{2}$  вертикальної осі трубної заготовки  $\varnothing 250$  мм

На рис. 1 показано, як під впливом нормального тиску прокатних валків і виникаючих розтягуючих напружень змінилася форма слідів дендритної структури в поверхневих шарах і на відстані  $\frac{1}{2}$  радіуса заготовки. Для поверхневих шарів і БЛЗ, і трубної заготовки, розташованих на відстані 100 ... 98 % радіуса заготовки, характерна наявність двох форм колишніх дендритів  $\delta$ -фериту стовпчастої і пластівчастої форми. В процесі гарячої деформації відносна зміна їх розмірів склала близько 10 %. Для цих шарів також характерно найменше ущільнення – відношення щільності слідів колишніх дендритів в деформованій структурі до такої в литій структурі (табл. 1). Це вказує на наявність зони утрудненої деформації в тонкому шарі металу, що знаходиться під контактною поверхнею.

Поява зони утрудненої деформації напряму пов'язана з виродженням зони ковзання в високому осередку деформації, коли всю його площу по контакту займає зона прилипання. Металу енергетично вигідніше, реалізувавши граничні сили тертя на контактній поверхні, загальмувати течію по її довжині. При цьому протяжність зони утрудненої деформації швидко убуває по висоті осередку [18].

Пластична деформація починає здійснюватися в приконтактному шарі, наступному за зоною прилипання. На деякій відстані від поверхні контакту розташовуються шари з інтенсивною пластичною деформацією. На рис. 1 мікроструктура сталі 09Г2С, що знаходиться в зоні інтенсивної пластичної деформації, представлена в поперечному та поздовжньому перерізі в шарах, що знаходяться на середині радіуса заготовки. При металографічному аналізі особливо яскраво інтенсивна пластична деформація слідів дендритної структури проявляється на поздовжніх шліфах зразків трубної заготовки. Тут також можна побачити динаміку зміни обрисів дендритних контурів, порівнявши цю структурну складову в литій і деформованій мікроструктурі.

Аналізуючи результати металографічного аналізу (табл. 1), можна відзначити, що вже на відстані 90 % радіуса заготовки відносна зміна середнього розміру колишніх дендритів (їх відносна деформація) становить  $\sim 40$  %. При просуванні до центральних шарів заготовки відносна деформація слідів дендритної структури плавно зростає і досягає свого максимуму  $\sim 50$  % на відстані  $\frac{1}{2}$  радіуса заготовки. Далі її величина зменшується до  $\sim 30$  та  $20$  % в шарах, розташованих на відстані 25 та 0 ... 10 % радіуса досліджуваної заготовки відповідно.

На рис. 2, б представлено графік зміни логарифмічної деформації по  $\frac{1}{2}$  вертикальної осі трубної заготовки  $\varnothing 250$  мм. Від поверхні заготовки і до її центру величина постійно знижується. До відстані 90 % радіуса це відбувається плавно, потім починається різке падіння значень висотної деформації від 3,3 до 1,3 в центрі заготовки.

Таблица 1

Зміна середнього розміру та щільності слідів дендритної структури по перерізу безперервнолітої і трубної заготовок

Розміри перерізу заготовки, мм	Відстань від центра до поверхні, %	Форма слідів дендритів	Середній розмір слідів дендритної структури $D^{1)}$ , мкм	Зміна середнього розміру дендритної структури		Щільність слідів дендритної структури, шт. / мм <sup>2</sup>	Ущільнення слідів дендритної структури $C$ , раз	Середнє по перерізу ущільнення слідів дендритної структури	Загальний коефіцієнт витяжки $\lambda$
				$\Delta D^{2)}$ , мкм	$\epsilon$ , %				
335 × 400	98...100	стовпчасті	36,36	–	–	963,08	–	–	–
		пластівчасті	109,05	–	–	107,07	–		
	90	стовпчасті	87,36	–	–	166,83	–		
	75	стовпчасті	127,08	–	–	78,84	–		
	50	стовпчасті	189,51	–	–	35,45	–		
	25	рівновісні	204,52	–	–	30,44	–		
	0...10	рівновісні	230,69	–	–	23,92	–		
Ø 250	98...100	стовпчасті	32,88	3,48	9,57	1177,73	1,23 <sup>3)</sup>	2,68	2,73
		пластівчасті	98,03	11,02	10,10	132,49			
	90	стовпчасті	51,07	36,29	41,54	488,18	2,93		
	75	стовпчасті	65,87	57,21	45,02	293,45	3,90		
	50	стовпчасті	90,50	94,01	49,61	155,46	4,38		
	25	рівновісні	138,58	56,54	27,65	66,30	2,18		
	0...10	рівновісні	189,34	41,35	17,92	35,52	1,48		

Примітки.

1. Середній розмір дендритної структури  $D$  – це сума середніх розмірів осей I-го і II-го порядку (ділянок без видимої ліквациї) та міждендритних просторів (ліквацийних ділянок).
2.  $\Delta D$  – це різниця між початковим розміром і розміром після деформації слідів дендритів в конкретному шарі.
3. В поверхньому шарі трубної заготовки величина ущільнення – це середнє арифметичне за двома значеннями.



Зіставлення даних металографічного аналізу з результатами математичного моделювання дозволило визначити ширину поширення зони інтенсивної (активної) пластичної деформації по вертикальній осі  $\frac{1}{2}$  перерізу аналізованої заготовки. Вона становить 65 мм і зосереджена в шарах, що знаходяться на відстані 40–92 % радіуса трубної заготовки  $\varnothing 250$  мм.

Крім цього, обидва методи дослідження показали, що в процесі гарячої прокатки за 5 проходів в системі калібрів прямокутник – круг центральні шари заготовки, що знаходяться на відстані 0...40 %, виявилися практично не підданими деформаційній дії, тобто по всій вертикальній осі ширина цієї зони пасивної деформації становить  $\sim 80$  % радіуса заготовки.

Таким чином, процес гарячої прокатки трубної заготовки  $\varnothing 250$  мм за 5 проходів в системі калібрів прямокутник – круг характеризується дуже високим ступенем нерівномірності деформації по висоті смуги, яка навіть в більшій мірі, ніж сили тертя на контактній поверхні, визначає напруження та деформації в осередку деформації в цілому.

Для визначення залежності ущільнення структури  $S$  в процесі деформації від загального коефіцієнта витяжки (табл.) та кількісної оцінки деформаційного пророблення металу в роботі [14] було запропоновано використовувати коефіцієнт пророблюваності слідів дендритної структури  $K$ , який визначається за формулою:

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

де  $\delta_\lambda$  – відхилення величини ущільнення слідів дендритної структури  $S$  від загального коефіцієнта витяжки  $\lambda$ .

Якщо  $K < 1$ , то при прокатці структура металу в цих шарах заготовки не зазнає особливої деформаційної дії. Якщо  $K > 1$ , то при прокатці структура металу заготовки в таких мікрооб'єктах знаходиться в зоні інтенсивної пластичної деформації.

Зміну коефіцієнта пророблюваності слідів дендритної структури низьколегованої сталі 09Г2С по перерізу трубної заготовки  $\varnothing 250$  мм показано на графіку (рис. 3).

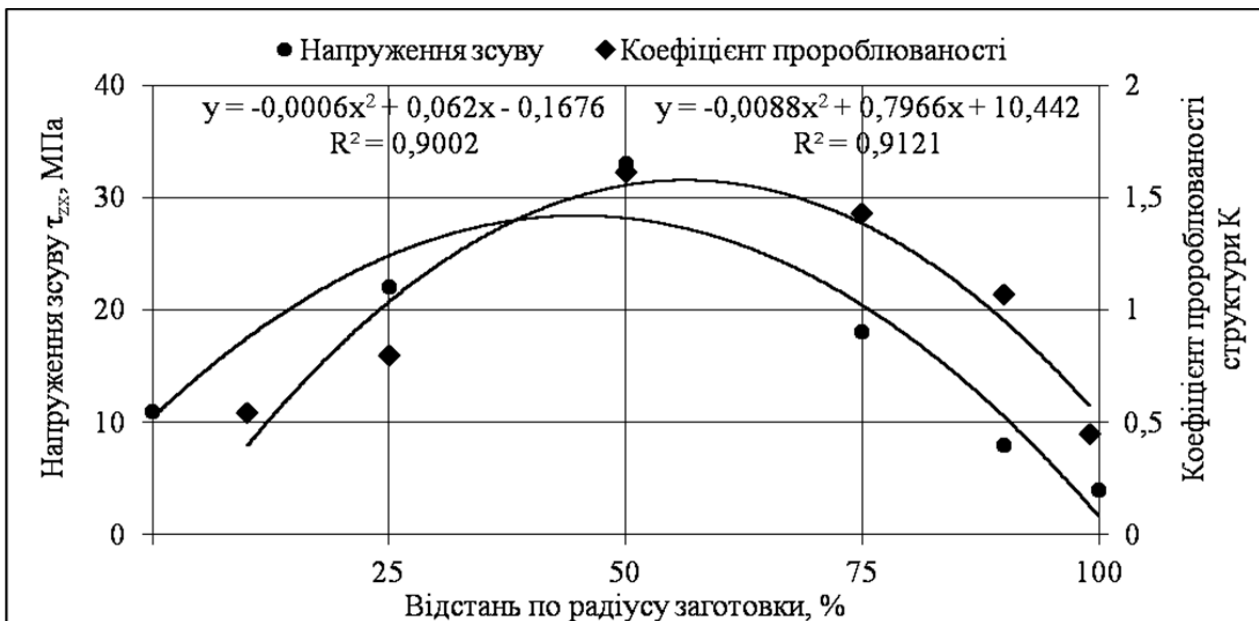


Рис. 3. Зміна напруження зсуву  $\tau_{zx}$  і коефіцієнта пророблюваності структури  $K$  по  $\frac{1}{2}$  вертикальної осі перерізу трубної заготовки  $\varnothing 250$  мм

Графік (рис. 3) демонструє, що зона інтенсивної пластичної деформації розташовується по  $\frac{1}{2}$  вертикальній осі поперечного перерізу заготовки на глибині від 90 до 40 % радіуса заготовки. Отримані дані по оцінці пророблюваності структури добре узгоджуються з характером зміни висотної логарифмічної деформації по  $\frac{1}{2}$  вертикальній осі трубної заготовки

Ø 250 мм (рис. 2, б). Центральні шари заготовки (0...40 % радіуса) після прокатки залишилися непроробленими, тобто вони зазнали тільки дію розтягуючих деформацій, і, ймовірно, їх деформація проходила в пружній області. Тобто, в зонах активної деформації метал деформується безпосередньо від дії прокатних валків. У зонах пасивної деформації метал змушений витягуватися вздовж напрямку прокатки під дією активних зон при виконанні умови нерозривності деформації.

Після аналізу стандартних параметрів деформації в програмі QForm були створені підпрограми для розрахунку тензорів напружень і деформацій. В результаті визначено, що характер зміни напруження зсуву  $\tau_{zx}$  повністю збігається з характером зміни коефіцієнта пророблюваності структури  $K$  (рис. 3). На даному графіку показано, що в зоні прилипання (100...98 % радіуса заготовки) величина  $\tau_{zx}$  характеризується мінімальними значеннями 4 МПа. На відстані 90 % радіуса заготовки вона дорівнює 8 МПа. Потім до глибини 50 % радіуса заготовки починається її різке зростання, максимальна величина досягає 32 МПа. При подальшому просуванні до центру заготовки значення  $\tau_{zx}$  знижуються та становлять 22 і 11 МПа в шарах металу, що знаходяться на відстані 25 % та 10...0 % радіуса заготовки.

Результати зіставлення значень напруження зсуву  $\tau_{zx}$  і коефіцієнта пророблюваності структури  $K$  (рис. 3) показали, що характер зміни напруження зсуву вздовж вертикальної осі  $\frac{1}{2}$  поперечного перерізу заготовки при виході з калібру якісно відповідає зміні ущільнення слідів дендритної структури. Ймовірно, в розглянутому процесі поздовжньої прокатки на деформацію слідів дендритної структури найбільший вплив зробило напруження зсуву  $\tau_{zx}$ .

Таким чином, при дослідженні впливу деформаційної дії на мікроструктуру сталі використання її структурної складової – хімічної неоднорідності, успадкованої від дендритної ліквіації кремнію і марганцю, – дозволяє виконати не тільки кількісну оцінку інтенсивності та локалізації деформації, але і якісно судити про зміну напруження зсуву по перерізу заготовки.

## ВИСНОВКИ

Створена модель процесу гарячої прокатки заготовки круглого профілю поперечного перерізу Ø 250 мм зі сталі 09Г2С, яка дозволила виконати аналіз напружено-деформованого стану металу, що сформувався під час прокатки в останньому, круглому, калібрі кліті 900 трубозаготівельного стану 900 / 750 – 3.

За допомогою моделі визначені зони активної і пасивної деформації та їх розташування в напрямку  $\frac{1}{2}$  вертикальної осі поперечного перерізу дослідженої заготовки. Показано, що глибина зони прилипання становить 12,5 мм, наступна за нею зона інтенсивної пластичної деформації розташована на відстані 50–112,5 мм від центра заготовки, в центральних шарах заготовки зосереджена зона пасивної деформації.

Результати математичного моделювання підтверджені даними металографічного аналізу. Зміна відносного розміру колишніх дендритів добре узгоджується зі зміною висотної логарифмічної деформації по перерізу трубної заготовки Ø 250 мм. Зіставлення значень напруження зсуву  $\tau_{zx}$  і коефіцієнта пророблюваності структури  $K$  показали, що характер зміни зсувного напруження уздовж вертикальної осі  $\frac{1}{2}$  поперечного перерізу заготовки при виході з калібру якісно відповідає зміні ущільнення слідів дендритної структури.

Отримані результати можуть стати підставою для розроблення практичних рекомендацій щодо вдосконалення технології виробництва великосортного прокату.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Определение степени прорабатываемости металла при деформировании* / В. Н. Лебедев, В. П. Троицкий, Ю. М. Антошенко, В. М. Коровина // *Известия вузов. Чёрная металлургия.* – 1977. – № 3. – С. 109 – 111.
2. *Теория прокатки крупных слитков* / А. П. Чекмарёв, В. Л. Павлов, В. И. Мелешко, В. А. Токарев. – М. : *Металлургия*, 1968. – 252 с.

3. Підвищення механічних властивостей прокату шляхом зміни температурно-деформаційних параметрів обробки / Я. В. Фролов, Г. В. Бергеман, А. А. Самсоненко, В. В. Андреев, О. М. Кузьміна // *Обработка металлов давлением: сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2018. – № 2 (47). – С. 169–172.*
4. Компьютерное моделирование процессов обработки давлением. Численные методы / В. Н. Данченко, А. А. Миленин, В. И. Кузьменко, В. А. Гринкевич. – Днепропетровск : Системные технологии, 2005. – 445 с.
5. Оспенникова О. Г. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением / О. Г. Оспенникова, М. В. Бубнов, Д. В. Капитаненко // *Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. – С. 141–147.*
6. Коноводов Д. В. Моделивання процесу поздовжньої прокатки штаб зі сплаву алюмінію системи Al-Mg-Sc / Д. В. Коноводов, В. В. Андреев, М. О. Мартинюк // *Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2018. – № 2 (47). – С. 39–45.*
7. Константинов Д. В. Мультимасштабное компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением / Д. В. Константинов, А. Г. Корчунов // *Вестник МГТУ им. И. Г. Носова. – 2015. – № 1. – С. 36–43.*
8. Воробей С. А. Прогнозирование размера зёрен аустенита при горячей деформации стали / С. А. Воробей // *Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии : сб. научн. трудов. – Днепропетровск : Візіон. – 2008. – Вып. 18. – С. 222–232.*
9. Wen-wu HE. Simulation and analysis on microstructure evolution of large generator retaining ring during multi-fire forging / Wen-wu HE, Jian-sheng LIU, Hui-qui CHEN and Hui-guang GUO // *Advanced Materials Research. – 2010. – Vols. 97–101. – P. 176–181.*
10. Duan Xing-Wang. Microstructure evolution of multi-heat forging and numerical simulation for 316LN steel / Duan Xing-Wang, Chen Hui-Qui and Liu Jian-Sheng // *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. – 2014. – 7 (5). – P. 1012–1016.*
11. Finite element modeling on microstructure evolution during multi-pass hot compression for AZ31 alloys using incremental method / Zhaoyang Jin, Kai Yin, Kai Yan, Defeng Wu, Juan Liu, Zhenshan Cui // *Journal of Material Science & Technology. – 2017. – 33. – P. 1255–1262.*
12. Оценка деформированного состояния металла по изменению параметров дендритной структуры / Г. В. Левченко, Е. Г. Дёмина, С. А. Воробей, Е. Е. Нефедьева, Г. А. Мединский // *Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2009. – № 5. – С. 71–75.*
13. Дёмина Е. Г. Метод определения степени накопленной деформации в трубных и колёсных заготовках по изменению плотности «следов» дендритной структуры / Е. Г. Дёмина // *Наука і металургія. Електронне видання збірки наукових праць. – Дніпро, 2017. – Вып. 1. – С. 44–61.*
14. Анализ прорабатываемости структуры стали 09Г2С в процессе горячей прокатки непрерывнолитой заготовки / Е. Г. Дёмина, Ж. А. Дементьева, А. С. Миргородская, Д. В. Гунченко // *Наука і металургія. Електронне видання збірки наукових праць. – Вып. 2. – Дніпро, 2018. – С. 4–18.*
15. Прокатные станы. В 3-х томах. Том 1. Обжимные, заготовочные и сортопрокатные станы 500–950 / *Справочник под ред. В. Г. Антипина. – М. : Металлургия, 1992. – 432 с.*
16. Третьяков А. В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением / А. В. Третьяков, В. И. Зюзин. – М. : Металлургия, 1973. – 224 с.
17. Прокатное производство. Производство блюмов, слябов и заготовок на блюминге «1150» и трубозаготовочном стане «900/750–3» новопрокатного цеха. Технологическая инструкция: ТИ 230-П 408 - 06. – 2006. – Введ. 2006-06-07. – Днепродзержинск : Открытое акционерное общество «Днепропетровский металлургический комбинат имени Ф. Э. Дзержинского», 2006. – 274 с.
18. Рудской А. И. Теория и технология прокатного производства / А. И. Рудской, В. А. Лунёв. – СПб. : Наука, 2008. – 527 с.

## REFERENCES

1. Opredelenie stepeni prorabatyvaemosti metalla pri deformirovanii / V. N. Lebedev, V. P. Troickij, Ju. M. Antoshenkov, V. M. Korovina // *Izvestija vuzov. Chjornaja metallurgija. – 1977. – № 3. – S. 109–111.*
2. Teorija prokatki krupnyh slitkov / A. P. Chekmarjov, V. L. Pavlov, V. I. Meleshko, V. A. Tokarev. – М. : Metallurgija, 1968. – 252 s.
3. Pidvishhennja mehanichnih vlastivostej prokatu shljahom zmini temperaturno-deformacijnih parametriv obrobki / Ja. V. Frolov, G. V. Bergeman, A. A. Samsonenko, V. V. Andreev, O. M. Kuz'mina // *Obrabotka metallov davleniem: sb. nauch. trudov. – Kramatorsk : DGMA, 2018. – № 2 (47). – S. 169–172.*
4. Komp'juternoe modelirovanie processov obrabotki davleniem. Chislennye metody / V. N. Danchenko, A. A. Milenin, V. I. Kuz'menko, V. A. Grinkevich. – Dnepropetrovsk : Sistemye tehnologii, 2005. – 445 s.
5. Ospennikova O. G. Komp'juternoe modelirovanie processov obrabotki metallov davleniem / O. G. Ospennikova, M. V. Bubnov, D. V. Kapitanenko // *Aviacionnye materialy i tehnologii. – 2012. – № 5. – S. 141–147.*
6. Konovodov D. V. Modeljuvannja procesu pozdovzhn'oi prokatki shtab zi splavu aljuminiju sistemi Al-Mg-Sc / D. V. Konovodov, V. V. Andreev, M. O. Martinjuk // *Obrabotka materialov davleniem : sb. nauch. trudov. – Kramatorsk : DGMA, 2018. – № 2 (47). – S. 39–45.*



7. Konstantinov D. V. *Mul'timasshtabnoe komp'yuternoe modelirovanie processov obrabotki metallov davleniem / D. V. Konstantinov, A. G. Korchunov // Vestnik MGTU im. I. G. Nosova. – 2015. – № 1. – S. 36–43.*
8. Vorobej S. A. *Prognozirovanie razmera zjoren austenita pri gorjachej deformacii stali / S. A. Vorobej // Fundamental'nye i prikladnye problemy chjornoj metallurgii : sb. nauchn. trudov. – Dnepropetrovsk : Vizion. – 2008. – Vyp. 18. – S. 222–232.*
9. Wen-wu HE. *Simulation and analysis on microstructure evolution of large generator retaining ring during multi-fire forging / Wen-wu HE, Jian-sheng LIU, Hui-qui CHEN and Hui-guang GUO // Advanced Materials Research. – 2010. – Vols. 97–101. – P. 176–181.*
10. Duan Xing-Wang. *Microstructure evolution of multi-heat forging and numerical simulation for 316LN steel / Duan Xing-Wang, Chen Hui-Qui and Liu Jian-Sheng // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. – 2014. – 7 (5). – P. 1012–1016.*
11. *Finite element modeling on microstructure evolution during multi-pass hot compression for AZ31 alloys using incremental method / Zhaoyang Jin, Kai Yin, Kai Yan, Defeng Wu, Juan Liu, Zhenshan Cui // Journal of Material Science & Technology. – 2017. – 33. – P. 1255–1262.*
12. *Ocenka deformirovannogo sostojanija metalla po izmeneniju parametrov dendritnoj struktury / G. V. Levchenko, E. G. Djomina, S. A. Vorobej, E. E. Nefed'eva, G. A. Medinskij // Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'. – 2009. – № 5. – S. 71–75.*
13. Djomina E. G. *Metod opredelenija stepeni nakoplennoj deformacii v trubnyh i koljosnyh zagotovkah po izmeneniju plotnosti «sledov» dendritnoj struktury / E. G. Djomina // Nauka i metalurgija. Elektronne vidannja zbirki naukovih prac'. – Dnipro, 2017. – Vip. 1. – S. 44–61.*
14. *Analiz prorabatyaemosti struktury stali 09G2S v processe gorjachej prokatki nepreryvnolitoj zagotovki / E. G. Djomina, Zh. A. Dement'eva, A. S. Mirgorodskaja, D. V. Gunchenko // Nauka i metalurgija. Ele-ktronne vidannja zbirki naukovih prac'. – Vip. 2. – Dnipro, 2018. – S. 4–18.*
15. *Prokatnye stany. V 3-h tomah. Tom 1. Obzhimnye, zagotovochnye i sortoprokatnye stany 500–950 / Spravochnik pod red. V. G. Antipina. – M. : Metallurgija, 1992. – 432 s.*
16. Tret'jakov A. V. *Mehanicheskie svojstva metallov i splavov pri obrabotke davleniem / A. V. Tret'jakov, V. I. Zjuzin. – M. : Metallurgija, 1973. – 224 s.*
17. *Prokatnoe proizvodstvo. Proizvodstvo bljumov, sljabov i zagotovok na bljuminge «1150» i trubozagotovochnom stane «900 / 750 – 3» novoprokatnogo ceha. Tehnologicheskaja instrukcija: TI 230-P 408 - 06. – 2006. – Vved. 2006-06-07. – Dneprodzerzhinsk : Otkrytoe akcionernoe obshhestvo «Dneprovskij metallurgicheskij kombinat imeni F. Je. Dzerzhinskogo», 2006. – 274 s.*
18. Rudskoj A. I. *Teorija i tehnologija prokatnogo proizvodstva / A. I. Rudskoj, V. A. Lunjov. – SPb. : Nauka, 2008. – 527 s.*

Фролов Я. В. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. ОМТ НМетАУ;

Дьоміна К. Г. – канд. техн. наук, ст. наук. співроб. ІЧМ НАНУ;

Андреев В. В. – канд. техн. наук, доц. каф. ОМТ НМетАУ.

НМетАУ – Національна металургійна академія України, м. Дніпро.

ІЧМ НАНУ – Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро.

E-mail: [frolov@metal-forming.org](mailto:frolov@metal-forming.org) ; [katya20@ua.fm](mailto:katya20@ua.fm) ; [andreiev@metal-forming.org](mailto:andreiev@metal-forming.org)