

УДК 669.017:621.685:621.0

Е.В. Парусов, канд. техн. наук, ст. наук. співр., зав. відділу, e-mail: tometal@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4560-2043>**Г.В. Левченко**, д-р техн. наук, проф., зав. лабораторією, e-mail: isi@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-1173-5320>**В.А. Луценко**, д-р техн. наук, пров. наук. співр., e-mail: lutsenkovlad2@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4604-5592>**С.В. Бобирь**, д-р техн. наук, пров. наук. співр., e-mail: svboby07@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6816-1554>**О.В. Парусов**, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: tometal@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-9879-6179>**І.М. Чуйко**, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: ferrosplav@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4753-614X>**Т.М. Голубенко**, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: sumer@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3583-211X>

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (Дніпро, Україна)

Наукові і технологічні основи виробництва високоефективних видів сортового та бунтового прокату

Відображено історію заснування, розвитку й головні наукові напрямки діяльності відділу термічної обробки металу для машинобудування Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України. Показано, що фахівцями відділу зроблено значний внесок у розробку наукових основ створення технологічних процесів виготовлення високоякісного металопркату широкого марочного складу та різноманітного призначення. Результати фундаментальних досліджень використовуються при розробці та вдосконаленні технологій виробництва сортового й бунтового прокату, який характеризується високими споживчими властивостями, масштабністю та результативністю. Наукові розробки, які базуються на подальшому розвитку уявлень про сучасне матеріалознавство, знайшли свою практичну реалізацію на багатьох металургійних, метизних та машинобудівних підприємствах. Промислово впроваджені інноваційні режими деформаційно-термічної та термічної обробки сталей як з прокатного, так і окремого нагрівів, у тому числі із застосуванням криогенної обробки, обумовили можливість підвищення їх класу міцності, довговічності, зносо- та термостійкості в процесі експлуатації. Розроблено методики ультразвукового контролю та диференційного магнітного аналізу легованих сталей; запропоновано авторські методики розрахунку фазового складу та температур фазово-структурних перетворень у легованих і вуглецевих сталях; створено комп'ютерні програмні оболонки для побудови ізотермічних та термокінетичних діаграм розпаду метастабільного аустеніту, моделювання умов реального виробничого процесу з достовірним прогнозуванням структури й механічних властивостей прокату різноманітного призначення в залежності від хімічного складу сталі та параметрів технологічного процесу. Впроваджені технологічні рішення відповідають рівню кращих світових аналогів, а результати фундаментальних досліджень зробили вагомий внесок у підвищення енерго- та ресурсозбереження металургійної, метизної та машинобудівної галузей промисловості України.

Ключові слова: бунтовий прокат, сортовий прокат, деформаційно-термічна обробка, енергозбереження, фазові перетворення, структурні перетворення, механічні властивості, канати, дрiт, металокард, валки, прошивні оправки, холодне об'ємне штампування.

Актуальність та стан об'єкту дослідження. Сучасні машинобудівні та метизні підприємства пред'являють все більш жорсткі вимоги до якісних і експлуатаційних властивостей готових металовиробів, що нерозривно пов'язано з якістю вихідної сировини – сортового й бунтового прокату. Застосування нових підходів до режимів деформаційно-термічної або термічної обробки дозволяє істотно впливати на механічні властивості сталей за рахунок цілеспрямованого впливу на процеси структуроутворення. Формування механічних і експлуатаційних властивостей визначається структурою сталі, яка залежить від хімічного складу, параметрів режиму гарячої пластичної деформації, температури та швидкості охолодження. Відділ термічної обробки металу для машинобудування Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України працює про-

тягом 23 років і є послідовником ідей наукових шкіл академіка Стародубова К.Ф., академіка Тарана-Жовніра Ю.М. та чл.-кор. Буніна К.П. У 1975 році в Інституті чорної металургії було засновано лабораторію термічної обробки сортового прокату й катанки, яку очолював кандидат технічних наук Поляков С.М. У 1996 році на базі цієї лабораторії під керівництвом доктора технічних наук Парусова В.В. було створено відділ термічної обробки металу для машинобудування. З 2015 року відділ очолює кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Парусов Е.В. У 2017 році до складу відділу увійшла лабораторія проблем структуроутворення і властивостей чорних металів під керівництвом доктора технічних наук, професора Левченка Г.В. Фахівцями відділу зроблено значний внесок у розробку наукових основ створення технологічних процесів виготовлення високоякісного

металопрокату широкого марочного складу й різноманітного призначення. Результати фундаментальних досліджень відділу постійно використовуються при розробці та вдосконаленні технологічних процесів виготовлення металопродукції, яка характеризується підвищеними споживчими властивостями, масштабністю та результативністю. Наукові розробки відділу, які базуються на розвитку подальших уявлень про сучасне матеріалознавство, знайшли свою практичну реалізацію на багатьох металургійних, метизних та машинобудівних підприємствах України та ближнього зарубіжжя. З урахуванням світових тенденцій розробляються нові вимоги та рекомендації для створення сучасних нормативних документів (державні стандарти, технічні умови, технічні угоди) на високоякісні види прокату відповідального призначення. Розроблено та промислово впроваджено принципово нові режими деформаційно-термічної та термічної обробки сталей і сплавів як із прокатного, так і окремого нагрівів, у тому числі із застосуванням криогенної обробки, захищені патентами на винахід. Розроблено методики ультразвукового дослідження кількості залишкового аустеніту в легованих сталях та диференційного магнітного аналізу надмалої кількості надлишкових фаз у сталях аустенітного класу; запропоновано авторські методики розрахунку фазового складу та температур фазово-структурних перетворень у легованих і вуглецевих сталях; створено комп'ютерні програмні оболонки для побудови ізотермічних і термодинамічних діаграм розпаду метастабільного аустеніту, моделювання реальних виробничих процесів із протіканням фазових і структурних перетворень, а також прогнозування механічних властивостей та інших якісних показників прокату різноманітного призначення в залежності від хімічного складу сталі й параметрів технологічного процесу. Підписана угода про асоціацію між Україною та Європейським Союзом створює основу для проведення подальших досліджень, які направлені на освоєння нових марок сталей, якісні показники яких повинні відповідати вимогам європейських стандартів, а також впровадження технологічних схем виробництва з урахуванням подальшого підвищення якості прокату при зменшенні загальних матеріальних витрат на його виробництво.

Мета роботи – аналіз та систематизація інформації про головні наукові напрямки досліджень та промислове впровадження розробок відділу термічної обробки металу для машинобудування Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Матеріал та методика досліджень. Під час отримання представлених результатів використано низько-, середньо-, високовуглецеві й леговані сталі, а також наступне лабораторне обладнання: муфельні нагрівальні печі; реверсивний прокатний стан «ДУО 280»; розривні машини «EUS-100», «TTDM-5004 Instron», «Amsler»; оптичні світлові мікроскопи «Neophot-2», «Neophot-32», «Axiovert 200M MAT», растровий електронний мікроскоп «VEGA TS5130MM» з енергодисперсійним спектрометром «INCA ENERGY-300», трансмісійні електронні мікро-

скопи «УЕМВ-100К» і «JEOL JEM-100 CX»; високоточні аналітичні ваги «ВЛА-200г-М»; маятникові копри «ПСВ-5», «ПСВ-30», машини «К-5» та «МГ-1» для випробувань на скручування та перегин; прилади для визначення твердості «ТК-М», «ТБ 5004», «ТП-7Р-1», «ТКС-1»; мікротвердоміри «ПМТ-3» і «МНТ-240»; «Метасекар» для підготовки зразків до металографічного аналізу.

Результати досліджень та їх обговорення.

1. Бунтовий прокат для металокарду і пружин [1–3]. Розроблено й успішно впроваджено ресурсозберігаючу технологію виробництва бунтового прокату діаметром 5,5 мм із високовуглецевої сталі 80КРД і 90К, яка призначена для виготовлення армуючого матеріалу для автомобільних шин – металокарду. При переробці бунтового прокату зі сталі 80КРД і 90К у високоміцний і надвисокоміцний металокард вдалося виключити як вихідне патентування прокату, так і проміжне на переробній заготовці діаметром 3,2 мм. На відміну від традиційної (застарілої) схеми переробки бунтового прокату кордового призначення патентування проводиться тільки на діаметрі 1,8 мм. Видалення поверхневої окалини здійснюється як механічним, так і хімічним способами. Глибина зневуглецьованого шару на поверхні прокату не перевищує в середньому 1,0 %, ефективна мікроструктура (кількість сорбітоподібного перліту за еталонними шкалами ГОСТ 8233-56 становить понад 75 %), розмір неметалевих включень (які деформуються – не більше 17 мкм, які не деформуються – не більше 12 мкм) дозволяє проводити безобривне волочіння бунтового прокату з сумарним ступенем холодної пластичної деформації не менше 95 %. При розробці технології виробництва бунтового прокату з високовуглецевої сталі 80КРД і 90К було встановлено особливості кінетики перетворення аустеніту при безперервному охолодженні, побудовано термодинамічні, ізотермічні та структурні діаграми; встановлено співвідношення між дисперсністю перліту та тимчасовим опором розриву, масою окалини й зневуглецьованим шаром; розроблено критеріальну оцінку деформованості прокату в дріт, яка враховує сумарну площу неметалевих включень у поперечному перерізі прокату дроту; встановлено вплив на міжпластинкову відстань у перліті температури початку й швидкості повітряного охолодження; визначено раціональні співвідношення вмісту бору до азоту для бунтового прокату з вуглецевих сталей, що ефективно впливає на зменшення деформаційного старіння й підвищення технологічної пластичності металу на метизному переробі. Розроблено науково-обґрунтовані режими виробництва бунтового прокату зі сталей 70 і 55 діаметром 6,5 і 5,5 мм, які призначені для виготовлення високоміцного пружинного дроту. Упроваджено наскрізні енергозберігаючі технології виробництва пружинного дроту діаметрами 3,70; 2,20; 1,75 і 1,40 мм. Розроблені режими деформаційно-термічної обробки прокату дозволили забезпечити його пряме волочіння (без застосування патентування) з попереднім видаленням поверхневої окалини механічним способом. Виготовлена металопродукція під час

приймально-здавальних випробувань показала повну відповідність вимогам європейських і національних стандартів та технічних умов.

2. Бунтовий прокат для високоміцних арматурних канатів (пасм) [4]. Одним із найбільш ефективних армуючих матеріалів на сучасному будівництві є арматурні канати (пасма), які використовуються як самостійно (вантові мости), так і в залізобетонних конструкціях (будівлі, віадуки, резервуари, ангари, нафтовидобувні платформи, атомні електростанції, аеропорти, тунелі тощо). Для виготовлення арматурних пасм використовується бунтовий прокат діаметром від 5,0 до 14,0 мм із вмістом вуглецю 0,70–0,90 %. При виробництві арматурних пасм класів міцності 1770, 1860 2060 МПа за EN 10138-3:2009 вихідна міцність прокату повинна бути не менша, ніж 1150, 1200 і 1250 МПа відповідно. Арматурні пасма отримують шляхом звивання дроту в 3-, 7- або 19-дротові канати з подальшою їх стабілізацією (короткочасний відпал при температурах 370–390 °С з протинатягненням із залишковою деформацією до 1,1 %). Стабілізовані арматурні канати мають ряд переваг перед канатами, виготовленими без стабілізуючої обробки, так як характеризуються збільшенням границі текучості й тимчасового опору розриву на 10–15 %; збільшенням границі пружності на 25–30 %; зниженням втрат напружень при релаксації на 5–8 %; підвищенням надійності та довговічності експлуатації різноманітних конструкцій. Європейські виробники виготовляють високоміцний дріт для арматурних канатів з високовуглецевих сталей C80D2...C88D2 (за EN ISO 16120-4:2011). Після завершення гарячої деформації бунтовий прокат піддається прискореному охолодженню на сучасних лініях типу Стелмор, що дозволяє виготовляти з такої сировини за схемою прямого волочіння (без попереднього та/або проміжного патентування) високоміцний дріт для подальшого звивання у високоміцні арматурні канати. Співробітниками відділу проведено роботи зі встановлення закономірностей впливу хімічного складу й режимів деформаційно-термічної обробки прокату з високовуглецевої сталі, легованої хромом та/або ванадієм і бором, на процеси структуроутворення, механічні властивості й технологічність переробки у високоміцний дріт, який призначений для виготовлення арматурних канатів. Із урахуванням встановлених закономірностей структуроутворення розроблено та промислово впроваджено інноваційну технологію виробництва бунтового прокату зі сталі C86D діаметром 8,0–11,0 мм, яка забезпечує ефективне поєднання структури, механічних та технологічних властивостей, дозволяє підвищити сумарний ступінь холодної пластичної деформації й отримувати високоміцний дріт діаметром 3,0–5,0 мм із використанням схеми прямого волочіння. На метизних підприємствах було виготовлено стабілізовані високоміцні арматурні канати діаметром 9,3; 12,5 та 15,2 мм із бунтового прокату діаметром 8,0; 10,0 та 11,0 відповідно. Виготовлені високоміцні арматурні канати під час приймально-здавальних випробувань показали повну відповідність вимогам EN 10138-3:2009.

3. Бунтовий прокат для виготовлення зварювального дроту [5]. Розроблено й успішно впроваджено технологію виробництва й переробки високоякісного бунтового прокату діаметром 5,5–6,5 мм підвищеної деформованості зі сталей Св-08Г2С, Св-08ГА, Св-10ГА, Св-10НМА, Св-08ХМ, Св-08ГМ, Св-10ГМ, Св-08ГНМ, Св-08Г1НМА, Св-08ХГ2СМФ, Св-10ХГ2СМФ, Св-08Г1НФАА, Св-08Г1Н2ФАА, S2Mo, SG1, SG2, SG3, які призначені для виготовлення зварювального обмідненого дроту діаметром 0,8–5,0 мм для напів- і автоматичного зварювання відповідальних конструкцій у середовищі захисних газів і під флюсом (ємностей для рідин і газів, магістральних газо- і нафтопроводів, конструкцій залізничних вагонів і важкого автотранспорту, мостів тощо). Традиційна технологія виготовлення зварювального дроту включає хімічне видалення окалини, волочіння бунтового прокату діаметром 5,5–6,5 мм в дріт діаметром 0,8–5,0 мм із застосуванням однієї або двох операцій пом'якшувальної термічної обробки (рекристалізаційного відпалу). Зазначена технологія виготовлення зварювального дроту з легованих сталей є досить енерговитратною: характеризується значною тривалістю технологічного циклу, вимагає використання більшої кількості енергоресурсів, технологічного обладнання й виробничих площ, підвищеної чисельності обслуговуючого персоналу та негативно впливає на навколишнє середовище. Співробітниками відділу розроблено принципи пластифікації бунтового прокату зварювального призначення, які знижують дію структурно-деформаційних зміцнюючих ефектів і полягають у наступному: зменшенні загального ступеня легування твердого розчину за рахунок зниження (в границях інтервалів вимог нормативної документації) вмісту в сталі вуглецю, марганцю, кремнію, фосфору, хрому, нікелю, міді, молібдену, ванадію; зниженні мікродеформації кристалічної решітки фериту й щільності дислокацій за рахунок зменшення в твердому розчині атомів впровадження – азоту, що досягається завдяки мікролегуванню сталі бором, з метою утворення дрібнодисперсних частинок нітриду бору при співвідношенні вмісту бору до азоту, близькому до стехіометричного у сполуці BN; зменшенні ліквідаційних явищ в безперервнолитих заготовках і прокаті; зменшенні кількості структурних концентраторів напружень (бейніто-мартенситні структури) шляхом проведення знеміцнюючої деформаційно-термічної обробки прокату на лінії типу «довгий» Стелмор. Важливим аспектом також є отримання бунтового прокату з поверхневою окалиною, яка повинна легко видалятися механічним способом. При цьому на поверхні прокату має бути мінімальна кількість залишкової окалини, що необхідно для стабільності технологічного процесу волочіння та якісного нанесення мідного покриття на поверхню дроту. Розроблена й промислово впроваджена технологія виробництва бунтового прокату підвищеної деформованості дозволяє виготовляти обміднений зварювальний дріт необхідних діаметрів із використанням механічного видалення поверхневої окалини та без застосування додаткової термічної обробки

(відпалу). Виготовлений зварювальний дрiт пiд час приймально-здавальних випробувань показав повну відповідність вимогам ГОСТ 2246-70.

4. Прокат для холодного об'ємного штампування (ХОШ) [6]. В Україні та країнах ближнього зарубіжжя прокат, призначений для ХОШ, виготовляють відповідно до вимог ГОСТ 10702-2016 і ДСТУ 3684-98, дотримання яких забезпечує виготовлення якісних кріпильних виробів із гарячекатаного прокату шляхом холодної деформації зі ступенем не менше ніж 75 %. При поставці сировини для виготовлення кріпильних виробів методом ХОШ для закордонних споживачів у ряді випадків критерії оцінки якості прокату відрізняються від вимог національних стандартів, що обумовило необхідність розробки нових і вдосконалення існуючих марок економнолегованих сталей і режимів їх обробки. Розроблено новий підхід до мікролегування сталей бором, згідно з яким, необхідна прогартуваність досягається при вмісті бору, що перевищує на 0,003 % за масовою часткою вміст азоту. У загальному вигляді співвідношення вмісту бору й азоту визначається за наступною формулою: $B \div N = (1 + K \div N)$, де K – коефіцієнт, який дорівнює 0,0025–0,0035 %. На підставі проведених досліджень створено сталь із розширеними границями вмісту бору (0,005–0,015 %), у порівнянні з раніше використовуваними (0,001–0,005 %), що дозволяє підвищити прогартуваність сталі при вмісті азоту за масовою часткою до 0,012 %. За допомогою методу багатокритеріальної оптимізації встановлено: 1) показники міцності та пластичності прокату з борвмісних сталей, підданого знеміцнюючій деформаційно-термічній обробці, при спільному збільшенні вмісту азоту і бору зростають; 2) при вмісті азоту до 0,0074 % підвищення вмісту бору приводить до зниження міцності та підвищення пластичності прокату; 3) твердість серцевини загартованого в маслі прокату з борвмісних сталей, що характеризує прогартуваність, досягає максимальних значень при вмісті азоту і бору 0,0062–0,0080 % та 0,0062–0,010 % відповідно. Нижні границі вмісту азоту і бору характерні для сталей, у яких поряд з бором містяться алюміній і титан, а верхні границі – для борвмісних сталей нового покоління. Показано, що холодна пластична деформація борвмісних сталей для ХОШ зі структурою фериту й пластинчастого перліту зумовлена зниженням міцності й підвищенням пластичності за умови виконання встановленого співвідношення між вмістом бору та азоту в сталі. На підставі теоретичних і експериментальних досліджень розроблено й промислово впроваджено наскрізну технологію виробництва прокату з економнолегованої електросталі з підвищеним вмістом бору та азоту, розлитої в заготовки перерізом 125×125 мм на машинах безперервного лиття. Розроблено та погоджено зі споживачами нормативну документацію на прокат із борвмісних сталей 12Г1Р, 20Г2Р, 30Г1Р, в яку внесено встановлені вимоги до якісних показників. У технологічні інструкції заводів-виробників внесено параметри знеміцнюючої деформаційно-термічної обробки прокату для ХОШ із борвмісних сталей, що забезпечує протікання процесів

статичної рекристалізації аустеніту та формування в структурі прокату співвідношення фериту до перліту, близького до рівноважного ($\Phi \div П = 65 \div 35$). Виготовлений прокат, який призначений для ХОШ, пiд час приймально-здавальних випробувань показав повну відповідність вимогам ГОСТ 10702-2016, ДСТУ 3684-98 і вимогам зарубіжних споживачів.

5. Крупносортний прокат із легованих сталей для автомобіле- і машинобудування [7]. Створено наукові основи для енергозберігаючих технологій виробництва прокату на обтискнузаготовчих і крупносортних станах металургійних підприємств України. Досліджено технологічні процеси гарячої обробки тиском, протифлокенної й термічної обробки крупносортного прокату з легованих сталей. Проаналізовано розрахункові методи визначення параметрів прокатки на обтискну-заготовчому стані й розроблено комп'ютерний спосіб розрахунку параметрів зусиль і навантажень у основних вузлах головної лінії стану. Досягнуто мінімально допустиме зниження часу ізотермічної витримки при термічній обробці із забезпеченням необхідних якісних показників прокату та встановлені особливості структуроутворення при охолодженні сортового крупносортного прокату зі сталі 42Cr4Mo2, що дозволило при комбінованій термічній обробці скоротити тривалість ізотермічної витримки на 38 % й заощадити витрати природного газу й електроенергії. Встановлено, що збільшення вмісту хрому й молібдену на 0,09 % звужує температурний інтервал перлітного перетворення та підвищує стійкість аустеніту, а збільшення швидкості охолодження у 1,6 рази приводить до збільшення частки бейнітної складової та зменшення кількості перліту. Встановлено вплив температурно-часових параметрів пом'якшувальної термічної обробки на структуроутворення й твердість прокату з хромомолібденової сталі. Суттєве зменшення значень твердості досягається завдяки зміні морфології карбідів у бейніті й перліті. При цьому мікротвердість відпущеного бейніту має менші значення, ніж сфероїдизовані перлітні ділянки, тому в початковому, охолодженому з підвищеною швидкістю прокаті поява більшої частки метастабільних (бейнітних) структур і зменшення частки перліту обумовлює при відпалі загальне зменшення твердості хромомолібденової сталі. Розроблено науково-обґрунтований режим комбінованої термічної обробки прокату з безперервнолітотої конструкційної легованої сталі, що включає прискорене охолодження після гарячої деформації, нагрівання до 660–700 °С з ізотермічною витримкою 4 години, охолодження з пiччу до 300 °С, далі – на повітрі. Запропоновано режим комбінованої термічної обробки, який направлено на отримання необхідних якісних показників легованого прокату з одночасним зменшенням енерговитрат на його виробництво. Встановлено особливості формування структури та зміни твердості прокату діаметром 100–140 мм з хромомолібденової й хромомолібденованадієвої (42CrMo4 та 31CrMoV9) сталі після нагрівання до різних температур аустенітизації та подальшого охолодження з різними швидкостями. Досліджено особливості впливу хімічного

складу на механічні властивості сталі та побудовано залежності, які дозволяють виявити вплив зміни вмісту хімічних елементів (хрому, молібдену й ванадію) на механічні властивості легованого сортового прокату через показник структурного стану. Встановлено, що для сталі 31CrMoV9 характерна наявність інтервалу аномального росту аустенітного зерна при температурі 950 °С, а підвищення температури аустенізації призводить до укрупнення зерені, що забезпечує уповільнення розпаду й підвищення стійкості переохолодженого аустеніту. Зміна температури завершення безперервного охолодження до 400–450 °С замість 200 °С скорочує час нагріву на 6 годин і знижує імовірність викривлення прокату. Розроблено науково-обґрунтовані режими термічної обробки, які забезпечують отримання необхідних властивостей гарячедеформованого прокату зі зниженням енерговитрат при проведенні відпалу хромомолібденової та хромомолібденованадієвої сталей. Запропонований режим термічної обробки сталей 42CrMo4 та 31CrMoV9 дозволяє гарантовано досягти вимог європейської нормативної документації, зокрема EN 10083:2006 та EN 10085:2001 відповідно.

6. Арматурний прокат для анкерного кріплення гірничих виробок та для армування залізобетонних конструкцій [8]. Визначено раціональний хімічний склад сталей і технологічні параметри виробництва гарячедеформованого арматурного прокату з гвинтовим профілем для анкерного кріплення гірничих виробок високої і особливо високої несучої здатності. Для безперервнолитих сталей із вмістом вуглецю 0,20–0,50 % встановлено, що хімічний склад аустеніту сталі не є домінуючою причиною утворення фериту або перліту під час його розпаду. Підвищення механічних властивостей доєвтектоїдних сталей після нормалізації пов'язане з утворенням в ліквіційних ділянках дендритної структури фериту, збагаченого домішковими елементами. Розвинено методи прогнозування механічних властивостей арматурного прокату після холодної пластичної деформації та способи підвищення показників пластичності холоднодеформованого арматурного прокату. Розроблено та введено в дію відповідну нормативну документацію на бунтовий прокат підвищеної міцності для виробництва холоднодеформованого арматурного прокату періодичного профілю класу В500 для армування залізобетонних конструкцій.

7. Інструмент для гарячого деформування металу [9–11]. Вдосконалено хімічний склад низьковуглецевих економнолегованих сталей для виготовлення інструменту гарячої деформації. В процесі проведення досліджень встановлено, що застосування сталей 20ХФ та 15ХСТ для виготовлення штампів гарячого деформування в умовах інтенсивного охолодження сприяє підвищенню їх експлуатаційної стійкості та є економічно доцільним. У результаті проведених заходів (вакуумування сталі, модифікування силікокальцієм і мікролегування титаном) зазначені сталі набули більш високих механічних властивостей і підвищеної експлуатаційної стійкості у порівнянні з традиційними сталями 30 та 20ХФ. Для виготовлення

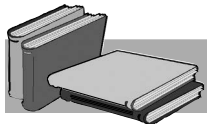
оправок пресу 10000 т запропоновано сталь 12Х5МА, яка має найбільшу експлуатаційну стійкість в умовах термоциклювання з інтенсивним охолодженням водою й помірних силових навантажень. Для виготовлення деталей пресуансону пресу 2000 т запропоновано сталь 17Х5МА, яка є більш жароміцною. Розроблено енергоефективний режим термічної обробки деталей зі сталі 17Х5МА, що дозволило підвищити стійкість інструменту гарячого деформування металу в 3–4 рази, скоротити тривалість термічної обробки на 50 % та зменшити витрати енергоносіїв: природного газу на 220 м³ і електроенергії на 221 кВт на одну обробку. Встановлено, що сталь 25Х2М1Ф має більш високу міцність при підвищеній температурі, ніж сталь 20ХН4ФА, а тому є більш ефективним матеріалом для виготовлення прошивних оправок трубопрокатного стану. Твердість і стійкість оправок зі сталі 25Х2М1Ф в цілому вищі, ніж для сталі 20ХН4ФА, що пов'язано з легуванням молібденом і більш високим вмістом хрому. Використання сталі 25Х2М1Ф й розробленого режиму термічної обробки забезпечило підвищення експлуатаційної стійкості оправок у 2,5 рази. Побудовано ізотермічні, термокінетичні й структурні діаграми сталей 50ХГМ та 45Х3ГНМФ, які призначені для виготовлення валків, встановлено особливості формування механічних властивостей у залежності від швидкостей охолодження до наднизьких температур (криогенна обробка). Розрахунковим методом встановлено розподіл термічних напружень у робочому валку вагою 85 т зі сталі 50ХГМ, оцінено рівень напружень, які виникають при фазових перетвореннях, а також рівень залишкових внутрішніх напружень. Розроблено рекомендації щодо вдосконалення параметрів режиму термічної обробки сталей, які призначені для виготовлення прокатних валків. Таким чином, науково-технологічні досягнення відділу термічної обробки металу для машинобудування відповідають рівню кращих світових аналогів. Результати фундаментальних досліджень зробили вагомий внесок у енерго- та ресурсозбереження металургійної, метизної та машинобудівної галузей промисловості України, що підтверджено значним економічним ефектом від упровадження розробок на промислових підприємствах. Отримані в результаті тісної співпраці співробітників відділу з працівниками технічних служб металургійних, метизних, машинобудівних підприємств нові види металопродукції дозволяють національним виробникам гідно представляти свою продукцію на міжнародних ринках збуту та успішно конкурувати з визнаними світовими лідерами у відповідній галузі промисловості.

Висновки

Представлено дослідницьку стратегію відділу термічної обробки металу для машинобудування, яка полягає у вирішенні сучасних проблем матеріалознавства, встановленні нових та подальшому розвитку існуючих фундаментальних положень, що дозволяє цілеспрямовано впливати на формування структури та механічних властивостей залізобетонних

металів і сплавів. Результати фундаментальних досліджень дозволили промислово впровадити ресурсо- та енергозберігаючі технології виробництва сортового й бунтового прокату з вуглецевих та складнолегованих сталей, призначених для промислового й цивільного будівництва, газо- та нафтопроводів, машинобудування й транспортної галузі. Основні напрямки діяльності пов'язані з дослідженням особливостей фазових та структурних перетворень під час деформаційно-термічної обробки вуглецевих і легованих сталей різноманітного призначення в потці сучасних прокатних станів. Дослідження відділу термічної обробки металу для машинобудування спрямовані на зменшення безповоротних втрат прокату, підвищення зносо- та термостійкості металів і сплавів, моделювання нерівноважних фазових пе-

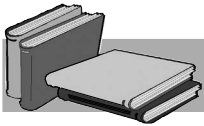
ретворень, контрольоване управління процесами структуроутворення, що дозволяє раціонально поєднувати механічні властивості сталей з експлуатаційними показниками готових металовиробів без застосування додаткових термічних обробок. Наукова цінність представлених розробок полягає у тому, що результати досліджень мають як фундаментальний, так і прикладний характер, що зумовлено постійним нерозривним зв'язком отриманих результатів із металургійною практикою. Це позитивно впливає не тільки на розвиток конкретної галузі промисловості, а й забезпечує подальше зростання реального сектору економіки України за рахунок отримання високотехнологічної металопродукції, на яку є попит з боку світових споживачів.



ЛИТЕРАТУРА

1. Парусов В.В., Сычков А.Б., Парусов Э.В. Теоретические и технологические основы производства высокоэффективных видов катанки. Днепропетровск: Арт-пресс, 2012. 376 с.
2. Lutsenko V.A., Peretyagina E.A., Vengura A.V., Bobkov P.A., Savinkov V.V. Energy-saving sorbitization of high-carbon wire rod in the 150 mill. *Steel in Translation*. 2013. Vol. 43. Iss. 5. P. 321–324.
3. Парусов Э.В., Парусов В.В., Парусов О.В., Сычков А.Б., Пришляк Р.Р., Сагура Л.В., Сивак А.И. Влияние качественных характеристик высокоуглеродистой катанки на свойства пружинной проволоки. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. науч. тр.* Днепропетровск: ПГАСА, 2009. Вып. 48. ч. 1. С. 34–38.
4. Parusov E.V., Parusov V.V., Sagura L.V., Derevyanchenko I.V., Dolgiy S.V., Gremechev S.A., Demyanova L.I. Development of energy- and resource-saving production technology of highstrength strands. *Metallurgical and Mining Industry*. 2016. № 5. P. 100–104.
5. Сычков А.Б., Парусов В.В., Нестеренко А.М. и др. Структура и свойства катанки для изготовления электродов и сварочной проволоки. Бендеры: Полиграфист, 2009. 608 с.
6. Парусов В.В., Парусов О.В., Сычков А.Б. Прокат из борсодержащих сталей для высокопрочных крепежных изделий. Днепропетровск: Арт-пресс, 2010. 160 с.
7. Lutsenko V.A., Anelkin N.I., Golubenko T.N., Shcherbakov V.I., Lutsenko O.V. Morphology modification of carbon chromium-molybdenum steel structure influenced by heat treatment. *CIS Iron and Steel Review*. 2012. № 1. P. 38–40.
8. Левченко Г.В., Оробцев А.Ю., Хорошилов В.В. Освоение производства проката с винтовым профилем класса прочности А600 для анкерного крепления горных выработок. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2014. № 3. С. 49–52.
9. Бобырь С.В., Демина Е.Г., Беседнов С.В., Стрижко О.Д. Влияние химического состава, твердости и типа поверхностных дефектов на стойкость штампов пресса 10 000 тонн из низколегированных сталей. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2014. № 1. С. 65–69.
10. Бобырь С.В., Нефедьева Е.Е., Лошкарев Д.В. Моделирование и оптимизация процесса отпуска стали 17Х5МА для инструмента горячей деформации. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. науч. тр.*, 2015. Вып. 30. С. 324–331.
11. Бобырь С.В., Демина Е.Г., Липатов И.Ю. Влияние термической обработки на структуру и свойства низколегированных штамповых сталей. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2012. № 4. С. 69–73.

Поступила 13.09.2019



REFERENCES

1. Parusov V.V., Sychkov, A.B., Parusov, E.V. (2012). Theoretical and technological bases of production of high species wire rod. Dnepropetrovsk: Art-press, 376 p. [in Russian].
2. Lutsenko V.A., Peretyagina, E.A., Vengura, A.V., Bobkov, P.A., Savinkov, V.V. (2013). Energy-saving sorbitization of high-carbon wire rod in the 150 mill. *Steel in Translation*. Vol. 43. Iss. 5, pp. 321–324 [in English].
3. Parusov E.V., Parusov, V.V., Parusov, O.V., Sychkov, A.B., Prishlyak, R.R., Sagura, L.V., Sivak, A.I. (2009). Effect of qualitative characteristics of high-carbon rolled wire on properties of springing wire. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie. Sb. nauch. tr. Construction, material science, engineering. Collection of scientific works*. Dnepropetrovsk: PGASA. Iss. 48. Part 1, pp. 34–38 [in Russian].
4. Parusov E.V., Parusov V.V., Sagura L.V., Derevyanchenko I.V., Dolgiy S.V., Gremechev S.A., Demyanova L.I. (2016). Development of energy- and resource-saving production technology of high-strength strands. *Metallurgical and Mining Industry*, no. 5, pp. 100–104 [in English].
5. Sychkov, A.B., Parusov, V.V., Nesterenko, A.M. et al. (2009). High carbon wire rod for the manufacture of high-strength reinforcing ropes. Bendery: Poligrafist, 608 p. [in Russian].
6. Parusov V.V., Parusov, O.V., Sychkov, A.B. (2010). Boron steel for high strength fasteners. Dnepropetrovsk: Art-press, 160 p. [in Russian].
7. Lutsenko, V.A., Anelkin, N.I., Golubenko, T.N., Shcherbakov, V.I., Lutsenko, O.V. (2012). Morphology modification of carbon chromium-molybdenum steel structure influenced by heat treatment. *CIS Iron and Steel Review*, no. 1, pp. 38–40 [in English].
8. Levchenko, G.V., Orobtssev, A.Yu., Horoshilov, V.V. (2014). Mastering the production of rolled steel with a screw profile of strength class A600 for anchoring mining workings. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost. Metallurgical and Mining Industry*, no. 2, pp. 49–52 [in Russian].
9. Bobyr, S.V., Dyomina, E.G., Besednov, S.V., Strizhko, O.D. (2014). The influence of chemical composition, hardness and type of surface defects on the resistance of press dies to 10,000 tons of low alloy steels. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost. Metallurgical and Mining Industry*, no. 1, pp. 65–69 [in Russian].
10. Bobyr, S.V., Nefedeva, E.E., Loshkarev, D.V. (2015). The modeling and optimization of tempering 17H5MA tool hot deformation. *Fundamentalnye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii. Sb. nauch. tr. Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. Collection of scientific works*. Iss. 30, pp. 324–331 [in Russian].
11. Bobyr, S.V., Dyomina, E.G., Lipatov, I.Yu. (2012). Influence of heat treatment on structure and properties low-alloyed die steels. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost. Metallurgical and Mining Industry*, no. 4, pp. 69–73 [in Russian].

Received 13.09.2019

Аннотация

Э.В. Парусов, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., зав. отделом, e-mail: tometal@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4560-2043>;
Г.В. Левченко, д-р техн. наук, проф., зав. лабораторией, e-mail: isi@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-1173-5320>; **В.А. Луценко**, д-р техн. наук, вед. науч. сотр., e-mail: lutsenkovlad2@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4604-5592>; **С.В. Бобырь**, д-р техн. наук, вед. науч. сотр., e-mail: svbobyr07@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6816-1554>; **О.В. Парусов**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: tometal@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-9879-6179>;
И.Н. Чуйко, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: ferrosplav@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4753-614X>; **Т.Н. Голубенко**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: sumer@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3583-211X>

*Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины
(Днепр, Украина)*

Научные и технологические основы производства высокоэффективных видов сортового и бунтового проката

Представлена история основания, развития и главные научные направления деятельности отдела термической обработки металла для машиностроения Института черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины. Показано, что специалистами отдела сделан значительный вклад в разработку научных основ создания технологических процессов производства высококачественного металлопроката широкого марочного состава и различного назначения. Результаты фундаментальных исследований используются при разработке и совершенствовании технологии производства горячекатаного сортового и бунтового проката, характеризующегося повышенными потребительскими свойствами, масштабом и результативностью. Научные разработки, основанные на дальнейшем развитии представлений о современном материаловедении, нашли свою практическую реализацию на многих металлургических, метизных и машиностроительных предприятиях. Промышленно внедренные инновационные режимы деформационно-термической и термической обработки сталей как с прокатного, так и отдельного нагревов, в том числе с применением криогенной обработки, обусловили повышение их класса прочности, долговечности, износо- и термостойкости в процессе эксплуатации. Разработаны методики ультразвукового контроля и дифференциального магнитного анализа легированных сталей; предложены авторские методики расчета фазового состава и температур фазово-структурных превращений в легированных и углеродистых сталях; созданы компьютерные программные оболочки для построения изотермических и термокинетических диаграмм распада метастабильного аустенита, моделирования условий реального производственного процесса с возможностью прогнозирования структуры и механических свойств проката различного назначения в зависимости от химического состава стали и параметров технологического процесса. Внедренные технологические решения соответствуют уровню лучших мировых аналогов, а результаты фундаментальных исследований сделали весомый вклад в повышение энерго- и ресурсосбережения металлургической, метизной и машиностроительной отраслей промышленности Украины.

Ключевые слова

Бунтовой прокат, сортовой прокат, деформационно-термическая обработка, энергосбережение, фазовые превращения, структурные превращения, механические свойства, канаты, проволока, металлокорд, валки, прошивные оправки, холодная объемная штамповка.

Summary

E.V. Parusov, PhD (Engin.), Senior Research Scientist, Head of Department, e-mail: tometal@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4560-2043>;
G.V. Levchenko, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of Laboratory, e-mail: isi@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-1173-5320>; **V.A. Lutsenko**, Dr. Sci. (Engin.), Leading Researcher, e-mail: lutsenkovlad2@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4604-5592>; **S.V. Bobyr**, Dr. Sci. (Engin.), Leading Researcher, e-mail: svbobyr07@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6816-1554>; **O.V. Parusov**, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: tometal@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-9879-6179>;
I.N. Chuiko, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: ferrosplav@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4753-614X>; **T.N. Golubenko**, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: sumer@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3583-211X>

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine (Dnipro, Ukraine)

Scientific and technological fundamentals of the production of highly efficient types of construction steel and wire rod

The history of the foundation, development and the main scientific areas of activity of the department of heat treatment of metal for mechanical engineering of the Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine are presented. It is shown, that the department specialists made a significant contribution to the development of the scientific foundations for the creation of technological processes for the production of high-quality rolled metal of a wide brand composition and for various purposes. The results of basic research are used in the development and improvement of the technology for the production of hot-rolled construction steel and wire rod, which are characterized by the increased consumer properties, scale and effectiveness. The scientific developments based on further development of ideas about modern materials science have found their practical implementation at many metallurgical, hardware and machine-building enterprises. The

industrially introduced innovative modes of deformation-heat and heat treatment of steels from both rolling and individual heating, including using cryogenic treatment, led to an increase in their strength class, durability, wear and heat resistance during operation. The methods of ultrasonic testing and differential magnetic analysis of alloy steels were developed; author's methods are proposed for calculating the phase composition and temperatures of phase-structural transformations in alloyed and carbon steels; computer program were created for constructing isothermal and thermokinetic diagrams of the decomposition of metastable austenite, modeling the conditions of a real production process with the ability to predict the structure and mechanical properties of rolled products for various purposes depending on the chemical composition of steel and process parameters. The implemented technological solutions correspond to the level of the best world analogues, and the results of basic research have made a significant contribution to improving the energy and resource saving of the metallurgical, hardware and machine-building industries of Ukraine.

Keywords

Wire rod, construction steel, deformation-heat treatment, energy saving, phase transformations, structural transformations, mechanical properties, ropes, wire, steel cord, rolls, piercing mandrels, cold forging.