

# ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА "ХПИ"

Сборник научных трудов

33'2009

*Тематический выпуск "Новые решения в современных технологиях"*

Издание основано Национальным техническим университетом «ХПИ» в 2001 году

Госиздание

Свидетельство Госкомитета по информационной политике

Украины КВ №5256 от 02.07.2001 г

## КООРДИНАЦИОННЫЙ СОВЕТ

### Председатель

Л.Л.Товажнянский, д-р техн.наук, проф.

### Координационный совет

А.П. Марченко, д-р техн. наук, проф.

Е.И. Сокол, д-р техн. наук, проф.

К.А. Горбунов, канд. техн. наук, доц.

Е.Е. Александров, д-р техн. наук, проф.

Л.М. Бесов, д-р техн. наук, проф.

Б.Т. Бойко, д-р техн. наук, проф.

Ф. Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.

М.Д. Годлевский, д-р техн. наук, проф.

А.И. Грабченко, д-р техн. наук, проф.

В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.

В.Д. Дмитриенко, д-р техн. наук, проф.

И.Ф. Домнин, д-р техн. наук, проф.

В.В. Елифанов, д-р техн. наук, проф.

О.П. Качанов, д-р техн. наук, проф.

В.Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.

С. И. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.

В.М. Кошельник, д-р техн. наук, проф.

В.И. Кравченко, д-р техн. наук, проф.

Г.В. Лисачук, д-р техн. наук, проф.

В.С. Лупиков, д-р техн. наук, проф.

О.К. Морачковский, д-р техн. наук, проф.

В.И. Николаенко, проф.

П.Г. Перерва, д-р экон. наук, проф.

В.А. Пуляев, д-р техн. наук, проф.

М.И. Рыщенко, д-р техн. наук, проф.

В.Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.

Г.М. Сучков, д-р техн. наук, проф.

Ю.В. Тимофеев, д-р техн. наук, проф.

Н.А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

В.И. Кравченко, д-р техн. наук, проф.

О.К. Морачковский, д-р техн. наук, проф.

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

### Ответственный редактор

Е.И. Сокол, д-р техн. наук, проф.

### Ответственный секретарь

О.В. Саввова, канд. техн. наук

Г.И. Львов, д-р техн. наук, проф.

А.С. Куценко, д-р техн. наук, проф.

И.В. Кононенко, д-р техн. наук, проф.

Л.Г. Раскин, д-р техн. наук, проф.

В.Я. Заруба, д-р техн. наук, проф.

В.Я. Терзиян, д-р техн. наук, проф.

М.Д. Узунян, д-р техн. наук, проф.

Л.Л. Брагина, д-р техн. наук, проф.

В.И. Шустиков, д-р техн. наук, проф.

В.И. Тошинский, д-р техн. наук, проф.

Р.Д. Сытник, д-р техн. наук, проф.

В.Г. Данько, д-р техн. наук, проф.

В.Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.

Б.В. Клименко, д-р техн. наук, проф.

Г.Г. Жемеров, д-р техн. наук, проф.

В.Т. Долбня, д-р техн. наук, проф.

Н.Н. Александров, д-р техн. наук, проф.

П.Г. Перерва, д-р экон. наук, проф.

Н.И. Погорелов, канд. экон. наук, проф.

## АДРЕС РЕДКОЛЛЕГИИ

61002, Харьков, ул. Фрунзе. 21 НТУ  
«ХПИ», СМУС Тел. (057) 707-60-40

Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць.  
Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях.- Харків: НТУ „ХПІ”-  
2009. -№33 - 144 с.

В сборнике представлены теоретические и практические результаты научных исследований и разработок, которые выполнены преподавателями высшей школы, аспирантами, научными сотрудниками, специалистами различных организаций и предприятий

Для научных работников, преподавателей, аспирантов, специалистов

У збірнику представлені теоретичні та практичні результати наукових досліджень та розробок, що виконані викладачами вищої школи, аспірантами, науковими співробітниками, спеціалістами різних організацій та підприємств Для наукових співробітників, викладачів, аспірантів, спеціалістів

Друкується за рішенням Вченої ради НТУ „ХПІ”, Протокол №11 від 30.10.2009

Національний технічний університет „ХПІ” 2009

**ПЕРЕДМОВА**  
**ПРО ІСТОРІЮ ДІЯЛЬНОСТІ КАФЕДРИ**  
**ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ**

Кафедра заснована у 1929 році. Кафедра готує бакалаврів, спеціалістів, та магістрів зі спеціальності 8.090206 – Технологія і обладнання для обробки металів тиском.

Обробка металів тиском (ОМТ) – це один з видів виготовлення деталей, який забезпечує матеріало- та енергозбереження. В усіх промислово розвинених державах ОМТ посідає одне з основних місць для виготовлення складних відповідальних деталей. Сьогодні ОМТ використовують для виготовлення найрізноманітніших деталей. Без ОМТ неможливо виготовлення літаків, танків, різноманітної зброї та набоїв, супутників та космічних станцій, комбайнів та тракторів, автомобілів та тролейбусів, тепловозів та вагонів, газових плит та холодильників, телевізорів, електронних обчислювальних машин, годинників, різноманітних ручок та механічних олівців, канцелярських скріпок та кнопок, багато-багато чого іншого. Рівень технології ОМТ безпосередньо впливає на рівень економіки держави. Це визначається наступним.

По-перше, технологічні процеси ОМТ дозволяють значно підвищити міцність деталей, особливо циклічну. Саме тому такі важко навантажені і відповідальні деталі як лопатки парових та газових турбін, толоки, гонки, корбові вали та клапани двигунів внутрішнього згоряння, ресори та пружини транспортних засобів, колісні пари вагонів та локомотивів, зубчасті колеса та вали редукторів, кулькові та роликові вальниці, багато інших деталей виготовляють виключно методами обробки металів тиском. Саме технологічні процеси ОМТ дозволяють отримати наноструктури і забезпечити якісні зміни властивостей матеріалів, застосувати нанотехнології.

По-друге, технологічні процеси ОМТ дозволяють отримати високі коефіцієнти використання металу, аж до 95...99%. Наприклад, виготовлення такої поширеної деталі, як прогонич, методами різання (з утворенням стружки) характеризується коефіцієнтом використання металу лише до 35%, в той час, як виготовлення того ж прогонича методами пластичної деформації (ОМТ) на холодновисаджувальному комбайні дозволяє підвищити коефіцієнт використання металу аж до 98%.

По-третє, технологічні процеси ОМТ характеризуються надзвичайно високою продуктивністю праці. Наприклад, виготовлення прогонича М12 на холодновисаджувальному комбайні дозволяє отримати до 120 деталей за одну хвилину. Це не йде ні в яке порівняння з виготовленням деталей будь-яким іншим способом.

На початку 20-х років у рамках кафедри «Паровозостроение» професор П.М.МУХАЧОВ почав щорічно випускати по 2...3 фахівця з ОМТ. Це було пов'язане з тим, що наукові інтереси Петра Матвійовича стосувалися не тільки паровозів, він був також знаним фахівцем в галузі обладнання для ОМТ, а його праці "Молоты и ковочные прессы" та "Прокатные станы" не втрачали актуальності багато десятиліть.

Кафедру обробки металів тиском як самостійний підрозділ заснував 1929 року її перший завідувач кандидат технічних наук доцент ФЕЛЬДМАН Ілля Йосипович (рис. 1). В СРСР він був одним із провідних спеціалістів в галузі проектування пароповітряних молотів. Разом з І.З. Табачниковим та М.А. Димшицем він видав фундаментальну монографію «Модернизация кузнечно-прессового оборудования». На Харківському турбінному заводі виконав модернізацію кувального молота, що забезпечило можливість обробляти на ньому леговані сталі та заощаджувати теплову

енергію. Він доклав багато сил до виховання багаточисельних інженерів-іноземців, особливо з Китаю, Німеччини, В'єтнаму. Підготував двох кандидатів технічних наук: С.М. Хмару та В.П. Смолянінова, які згодом стали завідувачами кафедри.



Рис. 1 - Фельдман І. Й.

За часів його завідування кафедра готувала спеціалістів з трьох спеціальностей: «Обробка металів тиском», «Механічне обладнання металургійних заводів», «Прокатне виробництво».

Склад кафедри в той час був достатньо різноманітним. Напрямок обробки металів тиском представляли доценти І.Й. Фельдман, Д.Л.Ходоско, О.М. Хмара, Л.І. Живов, ас. В.О. Євстратов; напрям механічного обладнання – доцент М.В. Римкевич, ст. викл. К.В. Левченко, ас. О.А.Коломойцев; напрям прокатного виробництва – доценти І.С. Дубко, Л.Г. Костін, ас. А.С. Шухов.

Ілля Йосипович незмінно очолював кафедру до 1961 року.

Після І.Й. Фельдмана кафедрою завідував кандидат технічних наук доцент ХМАРА Самуїл Мойсейович (1961...1974) (рис. 2). Він створював ХТЗ. Їздив у відрядження до Америки, де закуповував нові види технології гарячого штампування і обладнання для ХТЗ. У довоєнний час працював заступником начальника ковальського цеху ХТЗ. Під час війни працював начальником ковальського цеху Барнаульського машинобудівного заводу. За значні досягнення у виготовленні найкращих у світі танків Т-34 був нагороджений Орденом Трудового Червоного Прапора. С.М.Хмара створив першу і єдину в Україні галузеву лабораторію Міністерства верстатостроительної промисловості "Твердосплавні штампи". Разом із колегами кафедри К.С. Герасименком, В.П. Смоляніновим, В.І.Рудем та працівниками харківських заводів С.М. Хмара видав дві монографії з конструювання та використання у виробництві твердосплавних штамів, основні робочі деталі яких виготовляли з твердих сплавів ВК8, ВК15, ВК20. Це забезпечувало підвищення стійкості штамів у сотні разів. Результати цих робіт були запроваджені в першу чергу на харківських заводах: ХЕМЗ, ХЕЛЗ, Електроважмаш, 8ГПЗ, Технологічної оснастки, Штамів та пресформ тощо. Накопичення нових наукових знань та практичного досвіду дали можливість підвищити рівень навчального процесу та розширити тематику науково-дослідних робіт, залучити до науково-дослідної роботи (з оплатою!) кращих студентів кафедри, які навчались на різних курсах.



Рис. 2 – Хмара С. М.

Саме в цей час (за завідування С.М. Хмари) на кафедрі відбулася зміна поколінь: старші за віком викладачі, які пройшли нелегкий воєнний шлях, мали значний виробничий досвід, стали доцентами, перейшли на іншу роботу або вийшли на пенсію. Натомість прийшли молоді здібні викладачі – повоєнні випускники кафедри ОМТ, які проявили схильність до наукової та викладацької роботи (О.А. Коломойцев, В.О. Євстратов, Г.І. Кирилов, В.І. Рудь, В.Я. Даниленко). С.М. Хмара підготував шістьох кандидатів технічних наук.

Під безпосереднім керівництвом С.М. Хмари на кафедрі була створена конструкторсько-технологічна група, яку очолювала старший науковий співробітник Н.В. Бобкова. До складу групи входили ст. наукові співробітники К.С. Герасименко, та С.І Спірна, інженери О.І. Солдатенков та Є.І. Токарчук, робітник вищої кваліфікації І.В. Дробот. Ця група проводила дослідження, проектувала високостійкі твердосплавні штампи, виготовляла твердосплавні робочі деталі, запроваджувала ці штампи у виробництво. Це був дуже важливий крок в удосконаленні конструкцій штампів та підвищенні їх стійкості у десятки та сотні разів.

За часів завідування С.М. Хмари кафедра почала готувати спеціалістів лише з однієї спеціальності: «Обробка металів тиском», але по дві групи. Підготовка спеціалістів інших спеціальностей була передана до Дніпропетровського металургійного інституту.

На протязі майже 10 років (1974-1985) завідував кафедрою кандидат технічних наук доцент СМОЛЯНІНОВ Володимир Порфирійович (рис. 3). Він був чудовим організатором і методистом. Це були роки, коли у навчальний процес вузів запроваджувались методи програмованого навчання. Володимир Порфирійович був ентузіастом цієї справи и багато зробив для програмованого контролю як на кафедрі, так і в ХПІ. В Університеті він очолював методичну комісію НТУ з контролю якості навчання, зробив у цю справу значний внесок. За його ініціативи на кафедрі усіма викладачами були створені картки для швидкого опитування студентів. Ці картки дозволяли з'ясувати, наскільки глибоко студенти засвоїли попередній матеріал. Такі швидкі опитування дисциплінували студентів, забезпечували високу явку на лекції. Володимир Порфирійович багато сил докладав підготуванню кадрів вищої кваліфікації. Він підготував трьох кандидатів наук, на протязі 5 років був ученим секретарем спеціалізованої ради по захисту кандидатських дисертацій.



Рис. 3 – Смолянінов В. П.

Під час завідування кафедрою В.П.Смолянінова дуже важливу роль у запровадженні програмованого контролю відіграв старший викладач кафедри ЛЕВЧЕНКО Костянтин Володимирович. Він викладав кілька дисциплін, в тому числі й обладнання для оброблення металів тиском. На протязі багатьох років він фактично був неформальним лідером кафедри. Треба зазначити, що К.В. Левченко був вихователем за покликанням: він виховував не тільки студентів, але й молодих викладачів, зокрема О.А. Коломойцева, В.О. Євстратова, Г.І. Кирилова, В.І. Рудя та інших. Він був висококваліфікованим знавцем усіх видів обладнання. Завдяки цьому його запросили рецензувати підручник Л.І. Живова та А.Г. Овчинникова (Москва) з обладнання ковальсько-штампувальних цехів. К.В. Левченко був не тільки теоретиком, він мав також глибокі практичні знання. Завдяки цьому він одноосібно сконструював діючий штампувальний молот (єдиний в усьому колишньому Радянському Союзі!), який був виготовлений силами колективу галузевої лабораторії кафедри (під керівництвом і наглядом К.В. Левченка) на якому ще й дотепер студенти виконують лабораторні роботи з обладнання та технології об'ємного штампування.

На протязі 20 років (1985...2005) кафедру очолював доктор технічних наук професор ЄВСТРАТОВ Віталій Олексійович, дійсний член Української академії наук за напрямком машинобудування (рис. 4). На посаді заступника голови методичної ради університету він плідно працював в галузі змісту вищої технічної освіти. За його безпосередньої участі в ХІІ було створено п'ять поколінь навчальних планів з ОМТ та два покоління навчальних планів усіх машинобудівних спеціальностей. Він підготував 5 стандартів вузу, прийняв участь у розробленні концепції перебудови університетської освіти, розробив концепції фундаментальної та комп'ютерної підготовки, програму навчально-виховної роботи в університеті; створив нову структуру, призначену для підвищення рівня навчально-виховної роботи – «Навчально-методичне об'єднання спеціальності». Багато уваги приділяв підготовці наукових кадрів: був членом трьох спеціалізованих докторських рад (в ХІІ, ХАІ та ДДМА – Краматорськ), членом експертної ради ВАК України. Систематично виступав як офіційний опонент по кандидатських та докторських дисертаціях. Багато часу і уваги приділяв підготовці наукових кадрів: підготував 21 кандидата технічних наук. Зараз кафедра ОМТ майже цілком складається з його колишніх учнів-аспірантів.



Рис. 4 – Євстратов В. О.

Наукову, навчально-методичну і виховну роботу проф. В.О. Євстратов присвятив головній справі вищої школи – формуванню нашої національно свідомої інтелігенції. Завдяки цьому його ім'я внесено до Харківського біографічного словника «Выдающиеся педагоги высшей школы г.Харькова: Биографический словарь». Він володіє трьома мовами й залучає студентів до багатомовності, навчаючи їх українською, російською та англійською мовами.

Проф. В.О.Євстратов як відомий учений і педагог був неодноразово запрошений до закордонних університетів та наукових інститутів. Перебуваючи в 1994 році в Канаді, він приймав участь в широкомасштабній програмі "Project of Industrial Cooperation between Canada and Ukraine", яка виконувалась у двох провідних університетах в Торонто та Гамілтоні.

За значний внесок у науково-дослідну, методичну та навчально-виховну роботу проф. В.О. Євстратов нагороджений Орденом Дружби Народів, Почесною Грамотою Президії Верховної Ради України. Він обраний почесним професором Донецької державної машинобудівної академії (Краматорськ).

За часів завідування кафедрою В.О. Євстратова на кафедрі був створений потужний обчислювальний центр з виходом на Інтернет. У його створення значний внесок вклали також доценти ЧЕГРИНЕЦЬ Олег Олексійович та ТОРЯНИК Василь Володимирович. Вони вперше на кафедрі захистили кандидатські дисертації, теоретичні частини яких були засновані на використанні оригінальних програмних продуктах, які розробили самостійно.

З 2005 року завідує кафедрою кандидат технічних наук, виконуючий обов'язки професора ПЛЄСНЕЦОВ Юрій Олександрович (рис. 5). Він є провідним спеціалістом у галузі виробництва гнутих профілів. Видав монографію, що присвячена дослідженню та виробництву гнутих профілів. Як науковий керівник виконав та впровадив у виробництво більш ніж 20 науково-дослідних робіт за програмами державного комітету з науково-технічного розвитку із загальним економічним ефектом понад 15 млн. крб., що дозволило впровадити у виробництво більш як 20 видів складних гнутих профілів на багатьох заводах колишнього Радянського Союзу, зокрема на «Запоріжсталі» та Магнітогорському металургійному комбінаті. На кафедрі він започаткував читання такої важливої дисципліни, як «Сертифікація продукції у ковальсько-штампувальному виробництві».



Рис. 5 – Плеснецов Ю. О.

У різні роки на кафедрі працювали знані вчені й педагоги, керівники виробництва високого рівня.

Доктор технічних наук професор ЖИВОВ Лев Іванович (1953...1964) – автор трьох підручників з ковальського обладнання (рис. 6). Він був випускником МВТУ ім. Баумана, знаним у СРСР теоретиком. Традиції теоретичних підходів до досліджень він заклав у наукові дослідження кафедри ОМТ ХПІ, зокрема він залишив по собі методику побудови полів швидкостей та сіток ліній ковзання. Після від'їзду з Харкова він очолював кафедри ОМТ у Запорізькому й Московському машинобудівельному інститутах.



Рис. 6 – Живов Л. І.

Доктор технічних наук професор КОСТІН Леонід Григорович (1953...1966) – автор довідника з ОМТ (рис. 7). Він був випускником Томського політехнічного інституту, багато і плідно працював в галузі досліджень особливостей формозміни та застосування координатних сіток. Згодом завідувач кафедри ОМТ УЗПІ, а потім і проректор з наукової роботи цього навчального закладу.



Рис. 7 – Костін Л. Г.

Доцент ХОДОСКО Дмитро Лукич (1946...1961) – випускник кафедри ОМТ ХПІ, будівничий, а потім і перший начальник ковальського цеху ХТЗ (рис. 8). У період війни начальник ковальського цеху ЧТЗ, потім ковальського цеху заводу ім. Малишева. За виготовлення у великих кількостях найкращих танків Другої світової війни Т-34 був нагороджений Орденом Леніна. Завдяки його високому професіоналізму у 1944 році було виготовлено багато понадпланових танків. Це послугувало базою для виграшу Курської битви. У повоєнні роки Д.Л. Ходоско плідно працював доцентом кафедри, а також деканом механіко-металургійного факультету. Був блискучим лектором, дуже вміло передавав свій надзвичайно багатий виробничий досвід своїм учням. Він накопичив величезний обсяг статистичних даних з технології гарячого штампування, зокрема, витрат інструментальних сталей для виготовлення штампів, з якими радо ділився зі студентами.



Рис. 8 – Ходоско Д. Л.

Доктор технічних наук професор ЛОБАНОВ Віктор Костянтинович (1977 по сьогодні) – випускник кафедри ОМТ ХПІ, заступник начальника Центральної заводської лабораторії заводу ім. Малишева, заслужений винахідник СРСР, Лауреат Державної премії України, Академік Української академії наук (рис. 9). Він започатковував новий в СРСР спосіб виготовлення покованок без штампувальних нахилів. За цією темою 1986 р. у Ленінграді захистив докторську дисертацію. Впровадив у виробництво багато технологічних процесів штампування з наступним обтиском штампувальних нахилів.



Рис. 9 – Лобанів В. К.

Доктор технічних наук професор ТРИШЕВСЬКИЙ (2003 по сьогодні) – випускник кафедри ОМТ ХП, провідний спеціаліст в галузі виробництва гнутих профілів (рис. 10). Він є співавтором монографії з профілювання стрічкових матеріалів.



Рис. 10 – Тришевський О. І.

Кандидат технічних наук професор БОСІН Євген Євгенович (1983...2007) – випускник кафедри ОМТ ХП, директор ХНТК, Академік Української академії наук (рис. 11). Багато енергії вклав у створення філіалу кафедри на заводі ім. Малишева. Був ініціатором кадрового супроводження науково-дослідних робіт, які виконувала кафедра для ХНТК.



Рис. 11 – Босін Є. Є.

Зараз на кафедрі працюють три професора, доктора технічних наук, (з яких два – академіки Української академії наук), п'ять доцентів, кандидатів технічних наук, викладач-стажист, навчаються три аспіранти.

Кафедра має солідну матеріальну базу, загальною площею 554 кв. метрів, у тому числі сучасний обчислювальний центр, який має вихід на Internet.

Кафедра забезпечує читання більш як 50 дисциплін, у числі яких:

- Теорія пластичної деформації;
- Теорія технічних систем;
- Технологія об'ємного штампування;
- Технологія **листового** штампування;
- **Обладнання** ковальських і листоштампувальних цехів;
- Автоматизація й механізація технологічних процесів ОМТ;
- Системи автоматизованого проектування;
- Математичне моделювання й оптимізація в ОМТ тощо.

Кафедра **готує фахівців** широкого профілю в галузі технології оброблення металів тиском, проектування штампів та технологічного оснащення для ОМТ, конструювання та експлуатації обладнання для будь-яких галузей народного господарства: верстатобудування, електроніки та електротехніки, хімічної та медичної промисловості, виробництва товарів народного споживання й інших галузей у рамках спеціальності 7.090206 – обладнання для обробки металів тиском, у тому числі за спеціалізаціями: 1) Машини і технологія обробки металів тиском; 2) Системи автоматизованого проектування в ОМТ.

У цей час кафедра випускає по дві групи фахівців у кількості до 40 чоловік за денною формою навчання. Крім того, кафедра готує групу студентів заочного навчання. При кафедрі є аспірантура й докторантура.

Кафедра в особі завідувача проф. В.О. Євстратова та усього викладацького складу запровадила на факультеті нові технології навчання у вигляді навчально-методичного об'єднання спеціальності (НаМОС). Ця структура покликана створити науково обґрунтований стандарт освіти, сформулювати так звані «ядро знань спеціальності» та «ядро знань кожної дисципліни», визначення її місця у всьому циклі навчання студента. Одне з важливих завдань НаМОС – зниження міждисциплінарних бар'єрів, забезпечення запитаності загальних дисциплін, введення предметної області «Обладнання для оброблення металів тиском» до тематики лекцій, практичних та лабораторних занять, домашніх завдань, курсових робіт та проектів з наукових та загально інженерних дисциплін. Крім того, передбачається створення навчально-методичних комплексів (підручник – задачник – лабораторний практикум – методичні вказівки до самостійної роботи) а також навчально-методичної літератури зі спеціальних дисциплін. З дисципліни «Теорія оброблення металів тиском» такий комплекс у складі підручник, задачник та методичні посібники вже створений (автори – проф. В.О. Євстратов та доц. В.М. Левченко). Крім того, видано навчально-методичний посібник з дисципліни «Листове штампування» (автор – доц. О.А. Юрченко), підготовані до друку навчальні посібники з дисциплін «Підвищення стійкості штампів», «Теорія технічних систем» (автор – проф. В.О. Євстратов), «Математичні методи в обробленні металів тиском» (автор – доц. В.М. Левченко), «Енергетичний розрахунок корбового обладнання» (автор – завідувач кафедри Ю.О. Плєснецов), готується лабораторний практикум з дисципліни «Теорія пластичної деформації». В рамках НаМОСу заплановано створення системи критеріально орієнтованих тестів для оцінювання рівня шкільної підготовки студентів 1 курсу та рівня так званих «залишкових знань» студентів після кожного курсу навчання, а також розробка

запитань та завдань для Державного іспиту зі спеціальності. Для цього на кафедрі створюється спеціальна програма контролю, орієнтована на ЕОМ. Тут треба зазначити, що складання оригінальних програмних продуктів здійснюють системний програміст Я.В. Кутецький, а також студенти старших курсів спеціальності ОМТ. Важлива складова діяльності НаМОСу – формулювання мети, тактики та стратегії виховної роботи, розвиток ідей «Резонансного виховання» та «Педагогічного проектування», реалізація принципу «Культура виховується культурою», а також створення атмосфери «педагогіки співпраці» з високим потенціалом культури професійного мислення й діяльності (культури мови, логічних міркувань, обчислень, роботи на комп'ютері, оформлення звітів та пояснювальних записок, користування літературою, довідково-інформаційними матеріалами, в тому числі й Інтернетом, тощо).

*У числі випускників кафедри багато директорів підприємств (Ю.І. Бать, А.С. Шухов, А.Н. Марченко, Є.Є. Босін, В.Я. Даниленко, О.А. Чегринець, Д.В. Сталінський і ін.). Є знані науковці, лауреати Державних премій, підприємці, працівники космічного й військового відомства (В.К. Лобанов, В.М. Пилипенко, Г.В. Коган). Багато випускників кафедри працюють за кордоном на високих посадах (І.А. Нікітін, Ву-зуй Тхоай, В. Костов та інші).*

У науково-дослідній діяльності кафедри можна виділити чотири періоди.

Перший період був пов'язаний з пошуком і становленням НДР на кафедрі. Він тривав з 1929 по 1959 рік. У цей період під керівництвом першого завідувача кафедрою доц. І.Й. Фельдмана на кафедрі виконувалися роботи з різних напрямків ОМТ: дослідження технологічних процесів кування й штампування, вальцювання й пресування, а також нагрівання заготовок; дослідження й удосконалювання конструкцій пароповітряних штампувальних молотів, пресів, нагрівальних пристроїв і ін. У роботі з кожного напрямку брало участь не більше двох фахівців. Тому ефективність робіт була відносно невисокою.

З 1959 року почався другий, принципово новий період. І.Й. Фельдман пересвідчився у тому, що для досягнення суттєвих результатів треба створювати потужні науково-технічні колективи. Саме в цей час у промисловості СРСР усе гостріше стала відчуватись криза, пов'язана зі стійкістю штамів. Тоді доц. С.М. Хмара організував при кафедрі потужну галузеву науково-дослідну лабораторію Міністерства верстатобудівної промисловості "Твердосплавні штампи" (НДЛ ТШ) і став її науковим керівником. НДЛ ТШ була єдиною лабораторією такого роду в Україні. У ній на держбюджетному й господарсько-договірному фінансуванні працювало до 50 штатних наукових і інженерно-технічних співробітників, робітників високої кваліфікації, сумісників-викладачів, студентів старших курсів (рис. 12). Викладання спеціальних курсів вели 8 викладачів (рис. 13), які передавали студентам знання з перших рук. У НДЛ ТШ було забезпечене виконання повного циклу науково-дослідних робіт (рис. 14), дослідно-конструкторських робіт, виготовлення дослідних зразків твердосплавних штамів, проведення їх стійкісних випробувань, широке впровадження у різні галузі виробництва. Це дозволило розробити нові конструкції високостійких твердосплавних штамів і впровадити їх на десятках заводів Харкова, Мінська, Таллінна, Вільнюса, Риги, Горького й багатьох інших міст, де було зосереджено масове виробництво інструмента, машинобудівних і електротехнічних виробів. Ці роботи мали велике значення у підвищенні рівня викладання спеціальних дисциплін. По-перше, для проведення науково-дослідної роботи кафедра отримувала значні кошти. Це дозволило придбати та ввести в дію багато нового обладнання, на якому проводили лабораторні заняття (рис. 15). За результатами НДР і ДКР було опубліковано 2 монографії, більш як 50 статей. С.М. Хмара став засновником потужної наукової школи. Під його

керівництвом у цьому напрямі захистили дисертації доц. О.А. Коломойцев, доц. В.І. Рудь, ст.н.с. Н.В. Бобкова; успішно працювали доц. В.П. Смолянинов, ст.н.с. С.І. Спірина, ст.н.с. К.С. Герасименко, ст.н.с. А.І. Конєв і інші.



Склад інженерно-технічної частини лабораторії НДЛ ТШ



Рис. 13 – Склад викладачів кафедри ОМТ у 60-роки



Рис. 14 – Старший викладач кафедри О.А. Коломойцев та інженер П.Полуектов досліджують навантаження на твердосплавний штамп для виготовлення ротор-статорів електричних двигунів

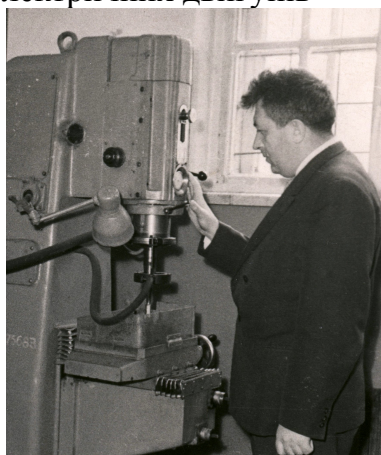


Рис. 15 - Старший викладач кафедри О.А. Коломойцев налагоджує електроерозійний верстат, призначений для виготовлення отворів у твердосплавних деталях

За результатами цієї роботи було видано дві монографії.

1. Хмара С.М., Смолянінов В.П., Герасименко К.С. Твердосплавные штампы. – Харьков: Прапор, 1971;

2. Хмара С.М., Коломойцев А.А., Рудь В.І. Конструирование твердосплавных штампов. – Харьков, Прапор, 1975.

Цей напрямок успішно розвивався аж до 1988 року, коли масштаби виробництва в СРСР різко зменшилися, і проблема стійкості перестала бути актуальною.

У 1964 році почався третій період. В цей час майже одночасно на трьох харківських заводах "Поршень", "Серп і молот" і "Велозавод" велися безуспішні спроби впровадження нового по тих часах процесу холодного видавлювання толокових пальців, штовхачів клапана й складних деталей велосипеда. Процес холодного видавлювання має багато незаперечних переваг (майже безвідхідне й високопродуктивне, повністю автоматизоване виробництво), але також один суттєвий недолік – вимагає комплексного рішення задачі проектування системи процес – штамп – обладнання. Якщо недотримуватися комплексного рішення, то можна отримати низьку стійкість інструмента, яка обумовлена надвисокими навантаженнями на пуансони та матриці. З ініціативи завідувача кафедрою С.М. Хмари на кафедрі під керівництвом доц. В.О. Євстратова була утворена група викладачів і наукових співробітників, що почали розвивати новий напрям «Розроблення технологічних

процесів холодного видавлювання та конструювання високостійких штампів». Концентрація наукових сил і залучення до НДР на госпдоговірній основі працівників інших кафедр ХПІ (зокрема кафедр опору матеріалів та математики) дозволили виконати кілька фундаментальних піонерських науково-дослідних робіт у цьому напрямку, здобути авторитет у масштабах усього колишнього Радянського Союзу. При кафедрі була утворена галузева лабораторія Міністерства верстатостроительної промисловості НДЛ ХВ, що стала науковим центром з видавлювання, а Харків став центром проведення всесоюзних науково-технічних конференцій. На базі НДЛ ХВ ХПІ у 1972 р. була створена Всесоюзна науково-технічна секція НТО МАШПРОМ «Холодне й напівгаряче видавлювання», а її керівником було обрано доц. В.О. Євстратов. Саме в НДЛ ХВ уперше в СРСР було системно вирішені проблеми стійкості штампів для видавлювання. Були створені принципово нові процеси видавлювання (наприклад, деталей типу накидних гайок з різьбленням), конструкції високостійких штампів для їхньої реалізації. Вони були впроваджені на десятках заводів Харкова, Таллінна, Казані, Вільнюса, Шахт, Каменськ-Уральська й багатьох інших міст, де було зосереджено масове виробництво дуже складних виробів інструментальної, автотракторної й електронної промисловості.

За результатами НДР і ДКР у цьому напрямку було опубліковано 5 монографій, більше 80 статей, отримано більш як 50 авторських свідоцтв. В.О. Євстратов 1988 р. у МВТУ ім. Баумана (Москва) захистив докторську дисертацію й став засновником наукової школи з видавлювання. Під його керівництвом 21 аспірант захистив кандидатські дисертації й успішно працює на кафедрі та промислових підприємствах. В їхньому числі доценти Г.І. Кирилов, В.Я. Даниленко, Г.І. Афанасьєва, В.І. Єремін, В.І. Кузьменко, Х.Д. Огбонна, О.О. Чегринєць, В.В. Торяник, С.Д. Нестеров, О.А. Юрченко, В.М. Левченко та інші.

Роботи у цьому напрямку неодноразово демонструвались на ВДНХ СРСР та були удостоєні золотої та бронзової медалі (рис. 16). Завідувач кафедри ОМТ проф. В.О. Євстратов широко пропагував новий прогресивний метод виготовлення деталей холодним видавлюванням. Він виступав на телебаченні (рис. 17), публікував чисельні статті у харківських та центральних газетах, про роботи у цьому напрямі кілька разів писала газета ХПІ «Політехнік».



Рис. 16 – Доц. В.О. Євстратов та кандидат технічних наук В.Я. Даниленко на ВДНХ СРСР разом із своїми експонатами деталей, що виготовлені холодним видавлюванням

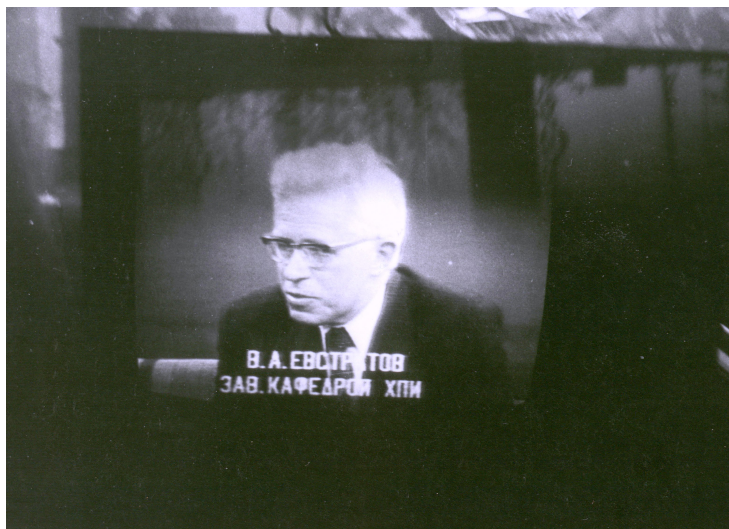


Рис. 17 – Завідувач кафедри ОМТ проф. В.О. Євстратов виступає по харківському телебаченню

За результатами цієї роботи було видано п'ять монографій:

1. Холодная и полугорячая штамповка на пресах: Методические рекомендации / Евстратов В.А., Иванов О.М., Кузьменко В.И. и др. – Москва: НИИ, 1981.
2. Расчет и совершенствование конструкций штампов для холодного выдавливания / О.А.Ганаго, В.А.Евстратов, Т.Л.Евстратова, В.Л.Марченко. – Москва: Машиностроение, 1987.
3. Евстратов В.А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов. – Харьков, Вища школа, 1987.
4. Оптимизация технологических процессов и конструкций штампов для холодного и полугорячего выдавливания / Евстратов В.А. и др. – Москва: ВНИИТЕМП, 1989.
5. Евстратов В.А., Крахт В.Б., Сопилкин Г.В. Теоретические основы малоотходной технологии изготовления резьб. – Старый Оскол, 2000.

Крім того, В.О. Євстратов підготував та видав підручник з теорії оброблення металів тиском, який у 1985 році був удостоєний Золотої медалі ВДНГ СРСР, а також задачник з цієї дисципліни.

На жаль, і цей напрямок успішно розвивався тільки до 1988 року, тобто, до того часу, коли промисловість СРСР почала розвалюватися.

З 1995 року на кафедрі під керівництвом проф. В.О. Євстратова почав розвиватись новий напрям – автоматизоване проектування процесів видавлювання й конструкцій високостійких штамів для видавлювання (САПР-ХВ). По цьому напрямку було виконано 3 кандидатські дисертації, створена одна з перших у ХПІ успішно працюючих версій САПР штамів для ХВ, опубліковано понад 20 статей. Сьогодні цей напрям розвивається, однак у зв'язку з недостатнім фінансуванням темпи розвитку не надто високі.

До 1990 року кафедра підтримувала тісні зв'язки з багатьма заводами й НДІ, здійснювала спільні науково-дослідні та конструкторсько-технологічні розробки з твердосплавних штамів, маловідходних процесів холодного й напівгарячого видавлювання й САПР.

Співпраця з галузевими науково-дослідними організаціями створила передумови широкого запровадження у виробництво розробок кафедри. Зокрема, спільна праця з ХЦКТБ (Харківським центральним конструкторсько-технологічним бюро електронної промисловості) дозволила запровадити у Харкові, Казані, Каменюк-Уральському нові технологічні процеси виготовлення деталей електронної апаратури. Спільна праця з

Київським ВІСП (Всесоюзним інститутом зварювального виробництва) та Харківським ВНИИГидроприводом (Всесоюзним науково-дослідним інститутом гідравлічних приводів) створила можливість запровадити у Харкові, в Шахтах (Ростовська обл.), Вільнюсі, принципово нові технологічні процеси та штампи для видавлювання деталей верстатів з ЧПУ, біметалевих толоків та підп'ятників гідромашин. Спільна праця з ХЦКБ велобудування послугувала основою для запровадження на Харківському велозаводі нових конструкцій деталей велосипеда та високостійких штамів-автоматів. Співпраця з Харківським СКТБтехоснастки (Спеціальним конструкторсько-технологічним бюро технологічного оснащення Мінвератотопрому) дозволила запровадити на двох харківських інструментальних заводах нових технологічних процесів видавлювання, конструкцій штамів та пристроїв для обладнання. Усі згадані розробки захищені майже 50 авторськими свідоцтвами.

Така широка співпраця з галузевими науково-дослідними організаціями та чисельними підприємствами дозволила накопичити нові знання з технології, конструювання штамів, проектування спеціалізованого обладнання для ОМТ, а це дало можливість значно поліпшити навчальний процес та науково-дослідну роботу студентів.

На превеликий жаль, зараз заготівельне виробництво в Україні практично зупинилося. В останні роки зв'язкам з виробництвом сприяла лише філія кафедри, яка була організована у 1988 році на базі Харківського науково-технологічного комплексу (ХНТК) при заводі ім. Малишева. Тут студенти старших курсів проходили практику, проводили лабораторні заняття на сучасному унікальному заводському обладнанні, виконували реальні дипломні проекти з використанням ЕОМ. На базі філії кафедри та ХНТК проходили стажування викладачі кафедри. Керував філією кафедри директор ХНТК проф. Є.Є. Босін, академік УАН.

З моменту проголошення незалежності України й до 2002 року кафедра була опорною кафедрою Міністерства освіти і науки, координувала навчально-методичну роботу зі спеціальності 7.090206 у вузах України, розробляла навчальні плани спеціальності, а її завідувач проф. В.О.Євстратов був обраний головою Навчально-методичного об'єднання спеціальності 7.090206 вузів України.

З 2002 року почався четвертий період науково-дослідної діяльності кафедри. Він пов'язаний з виробництвом деталей з листових або стрічкових заготовок – виготовленням гнутих профілів. Цей напрямок започаткований нинішнім завідувачем кафедри, виконуючим обов'язки професора Ю.О. Плєснецовим та доктором технічних наук О.І. Тришевським. Особливість нового технологічного процесу полягає в тому, що він може бути використаний на невеликих підприємствах (підприємствах середнього бізнесу), яких зараз тільки в Харкові налічується майже 10. Ці підприємства виробляють гнуті профілі, які використовують для виготовлення підсилювачів вікон, дверей, різноманітних переділів, підвісних стель, сайдингових облицювальних покриттів, трубчастих профілів різних форм тощо.

За цим напрямком опубліковано монографію:

Плєснецов Ю.А., Крюк А.Г., Тришевский О.И., Юрченко А.А. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения в 10-ти томах. – Том 5. «Обработка металлов методами пластического деформирования». – Одесса: ОНПУ, 2004. – 522с.

Захищена докторська дисертація (О.І. Тришевський). Готуються дві кандидатських дисертації (Т.Л. Коворотний та Д.І. Курандо), одна докторська дисертація (Ю.О. Плєснецов). В аспірантурі навчається один випускник магістратури.

З 1954 року кафедра має тісний зв'язок з Харківським Інститутом металів, який входить до складу державного підприємства «Енергосталь» і який є засновником цього актуального для сьогодення напрямку – виготовлення гнутих профілів. В цій установі працювало майже 40 наших випускників, які досить швидко по закінченні ХПІ обіймали керівні посади.

*Кафедра веде навчальний процес по чотирьох підручниках і вісьмох навчальних посібниках, які написали доценти І.Й. Фельдман, С.М. Хмара, В.П. Смолянинов, Г.І. Кирилов, В.І. Рудь, В.І. Кузьменко, О.О. Чегринцев, Ю.О. Плєснецов, професори Л.І. Живов та В.О. Євстратов, а також методичним вказівкам і навчальним посібникам, які підготовані всіма викладачами кафедри.*

*Підручник В.О.Євстратова «Теория обработки металлов давлением», який у 1985 році був удостоєний Золотої медалі ВДНГ СРСР, зараз перекладений українською мовою та готується до перевидання. У 2007 році українською мовою видано навчальний посібник «Теорія пластичної деформації: збірник задач і вправ» з грифом Міносвіти.*

В останні роки на кафедрі підготовані шість навчальних і контролюючих програмних продуктів для ЕОМ, за допомогою яких студент може вивчити відповідні розділи спецкурсів, проконтролювати якість своїх знань і в режимі автоматичного або автоматизованого проектування створити оптимальну конструкцію штампа для видавлювання, муфти або вала кривошипного преса, розробити процес об'ємного або листового штампування, розрахувати оптимальний режим нагрівання заготовки. На кафедрі на базі кафедрального обчислювального центру створено потужну бібліотеку на електронних носіях. Зроблені електронні копії не тільки тих підручників та навчальних посібників, які написані викладачами кафедри, але також широко популярних у середовищі студентів підручників та довідників, наприклад, довідника з листового штампування проф. Романовського В.П.

Кафедра готувала інженерів для багатьох закордонних країн. Більш як 100 випускників-іноземців кафедри працюють як керівники високого рангу в Китаї, В'єтнамі, Кореї, Болгарії, Угорщині, Німеччині, Польщі, Румунії, Чехії, Нігерії, на Кубі. Двоє з випускників кафедри (Ву-Зуй-Тхоай з В'єтнаму й Хамфри Дуружи Огбонна з Нігерії) виконали й захистили на кафедрі кандидатські дисертації.

На кінці 50-х років кафедра підготувала для китайської промисловості близько 100 інженерів з різних напрямів оброблення металів тиском (рис. 18). Дехто з них відвідував Харків. Зокрема, у червні 2001 року в ректораті ХПІ та на кафедрі ОМТ перебували двоє наших високоповажних китайських гостей: Чжоу Цзячи – випускник 1960 року кафедри обробки металів тиском ХПІ, зараз заступник голови комітету науки та техніки Китайської авіаційної корпорації, та Цзоу Цзянфен – його молодший колега, менеджер цієї ж корпорації.



Рис. 18 – Випуск китайських інженерів з оброблення металів тиском 1960 року

Наші гості повідомили про те, що минулого року в Китаї створено асоціацію випускників вузів, які навчались у колишньому СРСР. Ця асоціація видрукувала альбом, де вміщено фотографії, що відображують часи навчання наших китайських друзів у вузах СРСР, зокрема, Харкова. В тому альбомі є фотографія, де наші випускники, у тому числі Чжоу Цзячи, зображені в оточенні своїх однокашників з інших факультетів та ще молодих тоді проректорів, професорів, доцентів: Ф.І.Ахоніна, В.І.Атрощенко, В.М.Маєвського, Г.М.Шепеленка, молодого асистента В.Зубаря та багатьох інших. Альбом подаровано музею НТУ “ХПІ”, відвідання якого викликало у гостей надзвичайно великий інтерес. Директор музею Віра Володимирівна розповіла про історію, видатних учених і педагогів, про наукові досягнення та зв’язки ХПІ з міжнародною спільнотою. Було добре видно, як ця подія схвилювала наших гостей. Чжоу Цзячи у книзі відгуків залишив такий запис: ”Я гордий тим, що навчався у ХПІ ”

Після відвідання музею гості побували на кафедрі ОМТ. Крім викладачів кафедри, на цю зустріч були запрошені співучні Чжоу Цзячи: Є.Є.Босін – директор ХНТК, професор, Дійсний член Української академії наук; В.М.Грушевий – заступник головного технолога заводу “Електроапаратура”; В.К.Лобанов – доктор технічних наук, професор, лауреат Державної премії України, заступник начальника ЦЗЛ ДП “Завод ім. Малишева”, Дійсний член Української академії наук; А.М.Медолазів – доцент кафедри природничих наук підготовчого факультету ХПІ, канд. техн. наук (рис. 19). Було дуже цікаво спостерігати, як Чжоу Цзячи згадував своїх однокашників. Коли він зайшов на кафедру, то кілька секунд пильно дивився на Є.Є.Босіна, а тоді з подивом вимовив: ”Комсорг!?” і кинувся обнімати Євгена (який за часів навчання у ХПІ дійсно був комсоргом групи). Зустріч пройшла в надзвичайно дружній обстановці і плідному спілкуванні, у якому були не тільки спогади, але і перспективи співпраці.



Рис. 19 – Чжоу Цзячи (третій праворуч) в гостях у НТУ ХПІ разом із своїми одногрупниками та завідувачем кафедри проф. В.О.Євстратовим (четвертий праворуч)

На початку 60-х років кафедра підготувала для промисловості Німеччини високо-професійний загін інженерів з обробки металів тиском. Один з них – Андреас Муштер захистив кандидатську дисертацію – і посів посаду начальника відділу з міжнародних зв'язків найбільшого у ДДР підприємства VE Dienstleistung betrieb (рис. 20). Майже усі німецькі випускники ХПІ підтримували зв'язки з кафедрою. На згадку про роки навчання і про те, що їх і дотепер пов'язує дружба, яка була започаткована у ХПІ, вони надіслали нам фотографію вже теперішніх часів (рис. 21).



Рис. 20 – Випускник НТУ ХПІ 1967 року Андреас Муштер демонструє продукцію свого заводу



Рис. 21 – Випускники кафедри ОМТ НТУ ХПІ 60-х років у 2007 році

Викладачі кафедри приймали участь у роботі за кордоном.

Доцент кафедри Г.І. Кирилов два роки керував підготовкою інженерів на Кубі. Доценти В.І.Рудь, В.П.Смолянinov і В.І. Кузьменко проходили стажування в Угорщині, проф. В.О.Євстратов виконував у Канаді спільні дослідження в рамках програми "Project of Industrial cooperation between Canada and Ukraine".

У сучасних ринкових умовах кафедра виживає за рахунок невеликих обсягів держбюджетного фінансування й підготовки контрактних студентів, тому що ні технологічні або конструкторські розробки, ні САПР у цей час заготівельним виробництвом України поки не запитані. Є деякі зрушення у виготовленні гнутих профілів. У 2006...2008 роках кафедра виконала три господарсько-договірних роботи з об'ємом фінансування 22 тис грн.

У 2008 році кафедра запропонувала дві науково-дослідні держбюджетні теми, але вони ще досі не фінансуються.

Зараз кафедра розробила план дослідницько-пошукових робіт, які спрямовані на розроблення технології виготовлення деталей критичного імпорту: алюмінієвих та сталевих гнутих профілів, спеціальних профілів для виготовлення траків, тари для ліків, точних заготовок (зокрема для виготовлення монет). За цією тематикою працюють аспіранти кафедри, готуються наукові доповіді на наукових конференціях, друкуються наукові статті, пишуться підручники та монографії.

Важливо підкреслити, що кафедра обробки металів тиском готує бакалаврів, спеціалістів та магістрів з однієї із найважливіших спеціальностей. Сьогодні усі індустріально розвинені держави широко застосовують методи оброблення металів тиском, бо це є найефективніші методи виготовлення деталей у будь-яких галузях народного господарства.

*АХЛЕСТИН А. В.*, нач. отдела оборудования, ООО «МЕКАП», г. Харьков

### ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕПРИВОДНОГО ИНСТРУМЕНТА В ПРОЦЕССАХ ВАЛКОВОЙ ФОРМОВКИ

Приведены данные о величине и распределении скоростей при подгибке полки швеллера формируемыми элементами разной конструкции. Для каждой из них определены оптимальные диапазоны углов подгибки. Показаны преимущества формовки в клетях с боковыми цилиндрическими роликами.

Ключевые слова: неприводной инструмент, валковая формовка, эффективность, скорость, энергозатраты, качество.

Приведені дані про величину та розподіл швидкостей при підгинанні полки швелера формуючими елементами різної конфігурації. Для кожної з них визначені оптимальні діапазони кутів підгинання. Показані переваги формування в клітках з боковими циліндричними роликами.

Ключові слова: непривідний інструмент, валкове формування, ефективність, швидкість, енерговитрати, якість.

The data's on magnitude and distribution of speeds are reduced at a camber of a shelf of a channel section by molding elements of a different construction. For each of them the optimum ranges of corners of a camber are defined. Is shown, that most effective is the forming of roll-formed shapes in mills containing side cylindrical rollers.

Key words: instrument, roll-forming, effective, speed, expenditure of energy, quality.

#### 1. Введение

Повышение качества и снижение затрат на производство, в том числе энергетических является основным направлением развития производства. Одним из наиболее простых и в то же время действенных путей решения этой задачи является расширение применения в конструкциях профилегибочного оборудования неприводного формирующего инструмента [1, 2].

#### 2. Постановка проблемы

Отличительной особенностью неприводного инструмента (вспомогательные ролики, роликовые узлы, свободно вращающиеся элементы валков, а также отдельные валки в целом) является то, что он приводится во вращение движущейся в стане полосой, осуществляя одновременно ее формоизменение. При этом за счет изменения скорости вращения такого инструмента относительно как смежного с ним приводного инструмента (или его элементов), так и формируемой полосы уменьшается относительное скольжение в калибрах валков, что способствует повышению качества профилей и снижению энергозатрат на формовку.

Считается [1], что окружная скорость свободно вращающихся элементов валков примерно равна скорости движения полосы в стане. Однако, определение «примерно» не уточняется, условия применимости таких элементов не оговари-

ваются. И это при том, что они имеют различную форму рабочей поверхности (цилиндрическую, коническую, торообразную и др.), устанавливаются на подшипниках качения, скольжения, а то и вообще без них. Данные о распределении скоростей по длине рабочей части неприводных элементов валков и роликов в литературе отсутствуют.

Схемы совместного использования основного (валков) и вспомогательного (неприводных роликов) формующего инструмента в одной рабочей клетки признаны наиболее эффективными [2]. Однако исследований, подтверждающих это, практически нет. Исключение составляет работа [3], в которой экспериментально установлено, что при формовке в клетки с цилиндрическими роликами крутящий момент уменьшается на 57...66%, а с коническими роликами - на 30%.

Таким образом, процесс формовки с использованием неприводного инструмента изучен недостаточно, особенно в части скоростного режима. Эффективность применения такого инструмента в основном оценивается по величине крутящего момента.

Цель работы – аналитически определить распределение скоростей в калибрах валков, образованных с использованием неприводного формующего инструмента, и на этой основе оценить его эффективность.

### 3. Изложение основного материала исследований

Рассмотрим распределение скоростей в калибрах валков при формовке швеллера. Подгибка его полок (см. табл.) осуществляется различным формующим инструментом: коническими элементами, жестко связанными с валом; свободно вращающимися коническими элементами; неприводными коническими роликами с вертикальной осью вращения; неприводными цилиндрическими роликами. При этом во всех вариантах исполнения нижний валок является приводным, а верхний – неприводным.

Принимаем, что: формовка осуществляется в одной клетки; радиус скругления рабочей кромки верхнего валка – нулевой; скорость полосы равна окружной скорости цилиндрического элемента нижнего валка; массой неприводных элементов валков и роликов, а также силами трения в их опорах пренебрегаем; углы подгибки за проход - до 10 градусов; величина и распределение давлений в калибрах валков одинаковы во всех рассматриваемых вариантах.

При непрерывном процессе формовки скорость  $V_n$  полосы (табл., вар.1) является постоянной и равной 
$$V_i = \omega \frac{D_0}{2},$$

где  $\omega$  – угловая скорость приводного валка;

$D_0$  – диаметр цилиндрического элемента нижнего валка, а окружная скорость  $V_v$  верхнего валка соответственно равна скорости  $V_n$  полосы, которой он приводится во вращение.

Скорости точек на коническом элементе валка (табл., вар. I) возрастают с увеличением диаметра, на котором они расположены, и максимальное их значение составляет:

$$V_{1\max} = \omega \left( \frac{D_0}{2} + H \right),$$

а разность между наибольшей скоростью конического элемента и скоростью полосы, т.е. наибольшая величина относительного скольжения равна:

$$\Delta V_1 = V_1 \max - V_i = \omega \cdot H = \omega \cdot b \cdot \sin \alpha,$$

где  $b$  – ширина подгибаемой полки;

$H$  - высота калибра;

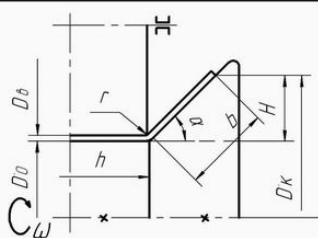
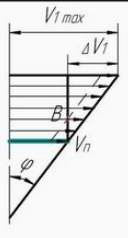
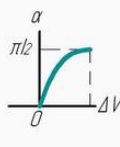
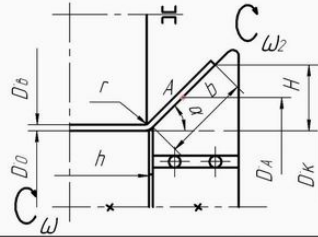
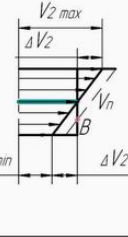
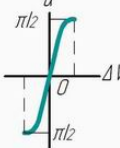
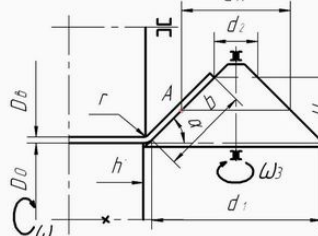
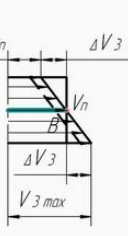
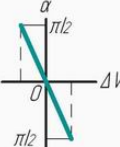
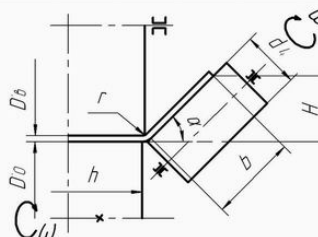
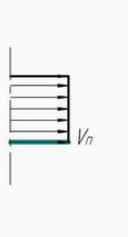
$\alpha$  – угол подгибки.

Можно  $\Delta V_1$  выразить через скорость полосы:

$$\Delta V_1 = V_i \cdot \frac{2H}{D_0} = V_i \cdot k_1.$$

Таблица 1

Скорости полосы и формирующих элементов разных конструкций при подгибке полки профиля

| Вариант | Схемы калибров валков                                                               | Эпюры скоростей                                                                      | Изменение $\Delta V$                                                                  |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| I       |    |    |    |
| II      |   |   |   |
| III     |  |  |  |
| IV      |  |  |  |

Назовем  $k$  – коэффициентом относительного скольжения. Он показывает во сколько раз величина скольжения отличается от скорости полосы.

В случае выполнения конического элемента свободно вращающимся на подшипнике (табл., вар. II) картина распределения скоростей отличается от рассмотренной выше. В точке  $A$ , расположенной на диаметре  $D_A$  (катающий диаметр), скорости полосы и конического элемента совпадают. Выше этой точки скорость элемента больше скорости полосы, а ниже – меньше. Положение точки  $A$  определяется из условия минимума затраченной энергии на вращение неприводного

элемента движущейся полосой. С учетом указанных выше допущений принимаем ее расположение на середине подгибаемой полки.

Для удобства геометрические и кинематические параметры калибров с применением неприводных элементов (варианты II – IV) определим, выразив их через основные параметры  $D_0$ ,  $H$ ,  $\omega$  и  $V_n$  калибра с обычным приводным нижним валком (вариант I). Тогда:

$$D_A = D_0 + H; V_{2 \max} = \frac{\omega_2}{2} \cdot (D_A + H); V_{2 \min} = \frac{\omega_2}{2} \cdot (D_A - H); \omega_2 = \omega \cdot \frac{D_0}{D_0 + H}. \text{ Очевидно, что } |\Delta V_2| = V_i \cdot \frac{\dot{I}}{D_0 + H}.$$

Таким образом, для II варианта исполнения калибра валков  $k_2 = \frac{H}{D_0 + H}$ .

При подгибке полки коническим роликом с вертикальной осью (табл., вар. III) происходит почти то же самое, что и при использовании свободно вращающегося конического элемента. Однако, вследствие указанной ориентации оси ролика имеются и отличия. Так, скорости точек на ролике изменяются в противоположном направлении: выше точки  $A$  они уменьшаются, а ниже – увеличиваются. Величины диаметров, соответствующих точкам на конической поверхности ролика по высоте калибра, изменяется по другой закономерности. То же можно сказать и об относительном скольжении.

Определяемые параметры приведем в окончательном виде:

$$d_1 = d_A + H \cdot \operatorname{ctg} \alpha; \quad d_2 = d_A - H \cdot \operatorname{ctg} \alpha; \quad \omega_3 = \omega \cdot \frac{D_0}{d_A};$$

$$V_{3 \max / \min} = V_i \cdot \frac{d_A \pm H \cdot \operatorname{ctg} \alpha}{d_A}; \quad \Delta V_3 = V_i \cdot \frac{H \cdot \operatorname{ctg} \alpha}{d_A}.$$

Если принять катающие диаметры конического ролика и свободно вращающегося элемента одинаковыми, т.е.  $d_A = D_A = D_0 + H$ , то  $\omega_3 = \omega_2$ , а

$$|\Delta V_3| = V_i \cdot \frac{\dot{I} \cdot \operatorname{ctg} \alpha}{D_0 + H}; \quad k_3 = \frac{H \cdot \operatorname{ctg} \alpha}{D_0 + H}.$$

И, наконец, подгибка полки цилиндрическим роликом (табл., вар. IV), который установлен с возможностью изменения угла  $\alpha$  наклона (подгибки) в осевой плоскости валков. Окружная скорость всех точек, расположенных на образующей цилиндрической поверхности ролика, практически равна скорости полосы, т.е. взаимодействие ролика и полосы осуществляется без проскальзывания, и на контактной поверхности реализуется трение качения.

Параметры этого варианта формовки таковы:

$$\omega_4 = \omega \cdot \frac{D_0}{d_4}; \quad |\Delta V_4| = 0; \quad k_4 = 0.$$

По мере подгибки полки от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  изменяется величина  $k$ , а следовательно, и относительное скольжение. На рис. 1 представлены графики, характеризующие это изменение при определенных геометрических параметрах валков ( $D_0 = 100$  мм) и формуемого профиля ( $b = 50$  мм). Наибольшая величина скольжения имеет

место в калибре I, в 2 раза меньше она в калибре III, и в 3 раза - в калибре II. Кривая III (весьма близкая к прямой линии) пересекается с кривыми II и I в точках C и D. Значения углов, соответствующих этим точкам, можно найти из условия равенства в них коэффициентов  $k$ . Точке C соответствует угол  $\alpha = 45^\circ$  при любых геометрических параметрах валков и полосы. Точка D находится в диапазоне углов от  $20,3^\circ$  до  $25,4^\circ$ .

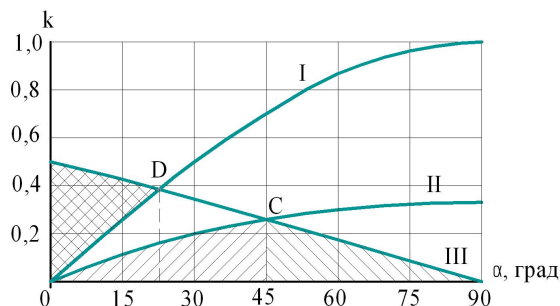


Рис. 1. Зависимость коэффициента  $k$  от угла подгибки полки элементами:  
I — коническим приводным; II — коническим свободно вращающимся;  
III — коническим роликом.

Это означает, что при подгибке полки от  $0^\circ$  до указанного диапазона углов скольжение на приводном коническом элементе меньше, чем на коническом ролике, а при подгибке от  $0^\circ$  до  $45^\circ$  на свободно вращающемся коническом элементе оно меньше, чем на коническом ролике. А при углах от  $45^\circ$  до  $90^\circ$  скольжение на коническом ролике меньше.

Таким образом, из рассмотренных вариантов конструкций неприводного инструмента наиболее эффективным является цилиндрический ролик, так как скольжение на нем практически отсутствует.

**4. Выводы:** Впервые получены данные о величине и распределении скоростей при формовке полосы неприводным инструментом различной конструкции. Они могут быть использованы при дальнейшем развитии теории формовки, в частности, для определения мощности процесса, а также при проектировании технологии и оборудования для изготовления профилей.

**Список литературы:** 1. Тришевский И. С. Теоретические основы процесса профилирования / И. С. Тришевский, М. Е. Докторов — М.: Металлургия, 1980. — 287 с. 2. Ахлестин А. В. О путях повышения качества тонкостенных гнутых профилей с покрытием / А. В. Ахлестин // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і в машинобудуванні. - Тематич. зб. наук. пр.- Краматорськ: ДДМА, 2004. — С. 614-619. 3. Бороденко В. Н. Экспериментальные исследования влияния технологических и геометрических параметров на усилие профилирования / В. Н. Бороденко, В. М. Королик, В. Ф. Гарбуз // Гнутые профили проката. Отрасл. сб. научн. тр. Вып. IV. — Харьков: УкрНИИМет, 1976. — С.33-37.

УДК 621.771.06–11К:621.771.25

**ЖУЧКОВ С.М.**, докт. техн. наук, проф., ИЧМ НАН Украины, г. Днепропетровск

**ТОКМАКОВ П.В.**, м.н.с., ИЧМ НАН Украины, г. Днепропетровск

**ЛЕЩЕНКО А.И.**, аспирант, ИЧМ НАН Украины, г. Днепропетровск

## **ПРИМЕНЕНИЕ ТРЕХОЧАГОВЫХ ПРОКАТНЫХ МОДУЛЕЙ – ПЕРСПЕКТИВНОЕ РЕШЕНИЕ В РАЗВИТИИ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОЙ СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ**

В статье рассмотрено современное состояние и перспективы развития процесса непрерывной сортовой прокатки с использованием неприводных прокатных клетей в линиях непрерывных станов.

Ключевые слова: непрерывная сортовая прокатка, резерв сил трения, приводная клеть, неприводная клеть, трехочаговый прокатный модуль.

У статті розглянуто сучасний стан та перспективи розвитку процесу безперервної сортової прокатки з використанням непривідних прокатних клітей в лініях безперервних станів.

Ключові слова: безперервна сортова прокатка, резерв сил тертя, привідна кліть, непривідна кліть, триосередковий прокатний модуль.

In clause the modern condition and prospects of development of process continuous rolling with use no driving rolling mills in lines continuous mills is considered.

Key words: continuous section rolling, reserve of forces of friction, driving rolling mill, no driving rolling mill, three of rolling module.

Одним из основных направлений развития технологии производства сортового проката и катанки является разработка новых эффективных процессов прокатки и технологического оборудования для их реализации, обеспечивающих, наряду с высокими качеством готового проката и производительностью станов, экономию энергоресурсов, высокую гибкость процесса при производстве проката широкого размерного и марочного сортамента, сокращение эксплуатационных затрат и расходов на реконструкцию существующих и строительство новых станов.

В настоящее время в мировой практике применяются непрерывные сортовые и проволочные станы, особенностью которых является неполное использование резерва втягивающих сил трения в очагах деформации приводных клетей (ПК). Это связано с тем, что часть энергии, подаваемой от двигателя к валкам в зоне отставания, используется на деформацию металла, а другая часть расходуется на преодоление сил трения, препятствующих процессу прокатки в зоне опережения. Следствием этого является увеличение количества клетей, массы оборудования и площади, занимаемой станом.

Современный рынок сортового проката и катанки в мире достаточно насыщен. Это обостряет конкуренцию на рынке проката. Установленные мощности прокатных станов превышают потребности рынка в прокате. Поэтому возможности станов, зачастую, используются не полностью. Для повышения конкурентоспособности прокатной продукции необходима реализация новых технологий, которые при высоком качестве готового проката обеспечивают снижение затрат на его производство и, соответственно, его себестоимости.

Неприводные прокатные клетки (НК) и другие устройства с неприводным инструментом применяются в различных процессах обработки металлов давлением. При этом конструкция неприводных прокатных клетей и устройств, а также их количество и место установки определяются конкретными задачами [1].

В практике сортопрокатного производства широко используется технология сдвоенной и строенной прокатки арматурной стали с продольным разделением рас-

ката в линии стана, с применением делительных устройств, имеющих неприводные ролики, устанавливаемых в выводных коробках приводных прокатных клетей [2]. Продольное разделение раската осуществляется за счет расклинивающего действия неприводных делительных роликов. Подача раската в делительное устройство и перемещение в нем в процессе продольного разделения осуществляется за счет частичного использования резерва стягивающих сил трения приводной прокатной клетки, на выходной стороне которой установлено делительное устройство.

В трубопрокатном производстве при прокатке труб на непрерывных станах безоправочного редуцирования используются чередующиеся приводные и неприводные прокатные клетки [3]. Здесь для предотвращения исчерпания резерва сил трения в очагах деформации ПК поддерживают различные условия трения на контакте металла с валками в приводных и неприводных клетях. Повышенный коэффициент трения на контакте металла с валками приводных прокатных клетей по отношению к коэффициенту трения в НК предотвращает проскальзывание металла в валках ПК и снижает межклетьевые усилия в стане.

Неприводные прокатные клетки применяют также при горячем калибровании сортового проката. Известны технологические процессы, основанные на использовании резерва стягивающих сил трения, образующегося в очагах деформации ПК для подачи прутка в волоку волочильного стана цепного типа и извлечения заднего конца проволоки из волоки после волочения с помощью калиброванных валков прокатных клетей, установленных перед или за волокой. Получили распространение процессы волочения в неприводных роликах, в том числе клетки–волоки с многовалковыми калибрами [4].

При разработке теоретических и технологических основ процессов прокатки с использованием резерва стягивающих сил трения в очагах деформации приводных прокатных клетей, в отделе физико–технических проблем процессов прокатки сортового и специального проката Института черной металлургии НАН Украины выполнен большой объем теоретических и экспериментальных исследований процесса непрерывной прокатки с использованием неприводных клетей, обобщенный в монографии [5]. На основании теоретических и экспериментальных исследований установлены основные преимущества применения неприводных прокатных клетей в линиях непрерывных станов, показана эффективность их использования при непрерывной сортовой прокатке, даны предложения по реконструкции действующих станов с использованием неприводного деформирующего инструмента.

Результаты фундаментальных исследований процессов сортовой прокатки, основанных на более полном использовании резерва стягивающих сил трения, нашли практическое применение на мелкосортно-проволочном стане 250/150-6 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Здесь освоена технология прокатки с использованием дополнительного деформирующего средства оригинальной конструкции – бесстанинной неприводной рабочей клетки вертикального исполнения с консольным расположением рабочих валков [6–8]. Неприводная клеть установлена в межклетьевом промежутке между клетями №6 и №7 черновой группы стана 250/150-6 (рис.1).

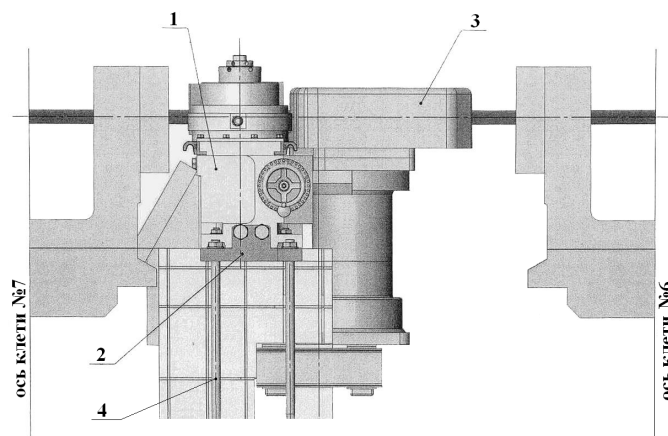


Рисунок 1 - Схема установки НК в межклетьевом промежутке вертикальной клетки №6 и горизонтальной №7 черновой группы стана 250/150-6:

1- не приводная клеть; 2- плитовина; 3- модернизированный передаточный жёлоб; 4- фундамент не приводной рабочей клетки

Применение этой технологии позволило решить две задачи: разгрузить черновую группу и повысить вытяжную способность стана в целом. Это создало предпосылки к расширению сортамента стана в сторону более мелких профиларазмеров готового проката без существенных капитальных затрат. Дополнительный результат, достигнутый в результате освоения этой технологии прокатки – снижение простоев стана на 2,5-3 %, уменьшение «бурежек», снижение износа валков клеток черновой группы стана, уменьшение энергозатрат при прокатке. Установлено, что использование опытно–промышленного образца не приводной клетки только в одном межклетьевом промежутке (между клетями №6 и №7) обеспечило экономию электроэнергии порядка 1,8 млн. кВтч в год, что в ценах на 01.08.2008г. составляет 716,4 тыс.грн.

Анализ результатов эксплуатации сортовых, непрерывно–заготовочных и трубных станов, оснащенных не приводными деформирующими устройствами, показал перспективность этого пути развития технологии, основанной на более полном использовании резерва втягивающих сил трения в очагах деформации приводных прокатных клеток путем установки не приводных деформирующих устройств в линиях непрерывных станов.

Дальнейшим развитием применения не приводных клеток для повышения эффективности процесса прокатки на непрерывных сортовых и проволочных станах является использование трехочаговых прокатных модулей (ТОМП), представляющих собой два комплекта приводных валков с общим приводом и расположенный между ними комплект не приводных валков горизонтального или вертикального исполнения [9]. Выполнена оценка технологических возможностей ТОМП в процессе непрерывной сортовой прокатки. Изучены особенности распределения усилий в очагах деформации ТОМП в процессе прокатки, разработана методика определения продольных усилий между клетями модуля с общим приводом [10]. Определены исходные данные для проектирования трехочаговых прокатных модулей, предназначенных для использования в процессе непрерывной сортовой прокатки.

Использование ТОМП возможно и при реконструкции непрерывных станов, если длина межклетьевых промежутков стана позволяет разместить ТОМП. Однако эта схема компоновки потребует реконструкции существующих линий привода рабочих клеток стана для обеспечения привода рабочих клеток ТОМП. Учитывая то, что в настоящее время в линиях современных сортовых и проволочных станов все более широкое распространение получает групповой привод клеток, например, в

конструкциях блоков чистовых и промежуточных клетей проволочных станов, по нашему мнению, разработка конструкции ТОМП с групповым приводом его приводных рабочих клетей, образующих первый и третий очаги деформации, представляет определенный интерес (рис.2).

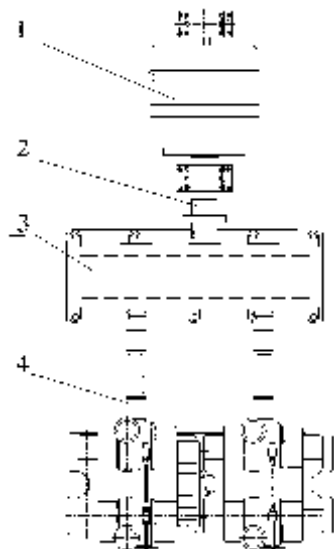


Рисунок 2 - Схема привода трехочагового прокатного модуля для условий промежуточной и чистовой групп сортовых станов со станинными приводными валками: 1 – электродвигатель; 2 – зубчатая муфта; 3 – шестеренная клетя; 4 – шпиндели

изменении программы прокатки (размерного и марочного сортамента прокатываемых профилей).

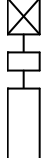
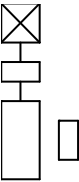
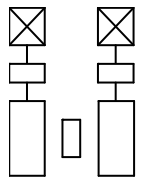
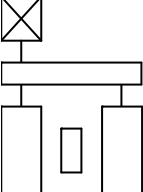
Дооснащение непрерывных сортовых станов достаточным количеством комплектов трехочаговых прокатных модулей, которые могут использоваться как основные средства деформации металла или как вспомогательные, выполняющие функции контроля размеров раската при прокатке сортовых профилей на непрерывных станах с широкой программой прокатки и различным сортаментом, позволит повысить эффективность производства проката.

Высокая вытяжная способность модуля обеспечивает сокращение количества клетей и уменьшение общей мощности приводов по сравнению со станами традиционной компоновки. В промежуточных группах современных проволочных и мелкосортных станов суммарная вытяжка в двух приводных клетях составляет приблизительно 1,6-1,7, а при установке трехочагового прокатного модуля возможно достижение вытяжки до 2,2, при этом сокращается количество клетей стана (табл. 1).

Таблица 1

Схемы процессов прокатки с использованием резерва втягивающих сил трения

|  | Вариант компоновки клетей | Габариты, мм * | Масса клетей | Суммарный коэфф. вытяжки $\Sigma\mu$ | Количество приводов | Работа в автономном режиме |
|--|---------------------------|----------------|--------------|--------------------------------------|---------------------|----------------------------|
|--|---------------------------|----------------|--------------|--------------------------------------|---------------------|----------------------------|

|                                                                |                                                                                    |      |                   |             |   |     |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------|-------------------|-------------|---|-----|
| Приводная клеть                                                |   | 1400 | 1                 | $\leq 1,4$  | 1 | да  |
| Комплекс приводная-неприводная клетки                          |   | 2100 | 1,05<br>-<br>1,10 | $\leq 1,7$  | 1 | нет |
| Комплекс приводная клеть - неприводная клеть - приводная клеть |   | 4550 | 2,05<br>-<br>2,10 | $\leq 2,35$ | 2 | да  |
| Трехочаговый прокатный модуль                                  |  | 3200 | 2,05<br>-<br>2,10 | $\leq 2,2$  | 1 | да  |

Примечание \* Габаритные размеры клеток принималась исходя из размеров стана 250/150-6 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог».

Компоновка технологического оборудования ТОМП позволит более полно использовать резерв сил трения, образующийся при прокатке в очагах деформации смежных приводных клеток, уменьшить расход энергии, повысить КПД процесса прокатки, а также снизить металлоемкость стана без снижения (или повышения) его вытяжной способности. Упрощается обслуживание стана, так как при общем приводе приводных клеток происходит саморегулирование межклетевых усилий в промежутке "первые приводные – неприводные валки" и "неприводные – вторые приводные валки", т.е. межклетевые усилия устанавливаются такими, какие необходимы для осуществления деформации металла в НК. В результате снижается вероятность аварийных ситуаций, вызванных действиями обслуживающего персонала, уменьшаются эксплуатационные расходы, и повышается стабильность процесса прокатки [11].

Использование этих разработок уже сегодня дает возможность:

- снизить энергозатраты на 15-20 % за счет уменьшения расхода энергии на собственно процесс деформации и за счет уменьшения потерь энергии в линиях привода рабочих клеток;
- повысить технологическую гибкость стана: при необходимости либо увеличить его вытяжную способность, либо увеличить дробность деформации;
- сократить габариты технологических линий станов, площади для их размещения, а, следовательно, и уменьшить капитальные затраты на строительство новых и реконструкцию действующих станов;
- появляется возможность перевода реконструируемых станов на увеличенное сечение заготовки (например, при переходе на непрерывнолитую заготовку)

без увеличения габаритов и количества приводных рабочих клеток при минимальных финансовых затратах.

## ВЫВОДЫ

Процессы прокатки, основанные на использовании резерва втягивающих сил трения, могут применяться для решения различных технологических задач, возникающих при производстве проката: повышения производительности станов, снижения энергопотребления при прокатке, увеличения выхода годного, сокращения эксплуатационных расходов и т.д. Эффективность использования этих процессов при производстве сортового и фасонного проката подтверждена их практической реализацией.

Процесс непрерывной сортовой прокатки с использованием трехочаговых прокатных модулей, разработанный в Институте черной металлургии НАН Украины, и являющийся логическим развитием процессов прокатки с применением неприводных рабочих клеток, относится к новым эффективным процессам прокатки. Его применение позволит повысить производительность станов, обеспечит экономию энергоресурсов, гибкость процесса при производстве проката широкого размерного сортамента, сократить эксплуатационные затраты и затраты на реконструкцию существующих и строительство новых станов.

**Список литературы:** 1. Жучков С.М. Эффективность использования современных технологических концепций при реконструкции непрерывных сортовых станов // Металлург. – 1998. – № 1. – С. 29-32. 2. Процесс прокатки-разделения с использованием неприводных делительных устройств / С.М. Жучков, А.П. Лохматов, Н.В. Андрианов, В.А. Маточкин. - М.: «Издательство «Пан пресс», 2007. – 360 с. 3. Лохматов А.П., Жучков С.М., Кулаков Л.В. Концепция развития технологии и оборудования непрерывных сортовых прокатных станов // Сталь. – 1995. – № 5. – С. 51-53. 4. Исследование процесса получения высокоточных профилей методом волочения в роликовых волоках / С.М. Жучков, А.П. Лохматов, К.Ю. Ключников и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2005. – С. 26-27. 5. Непрерывная прокатка сортовой стали с использованием неприводных рабочих клеток / А.П. Лохматов, С.М. Жучков, Л.В. Кулаков и др. - К.: Наук. думка, 1998. – 239с. 6. Исследование и разработка технологии непрерывной прокатки с использованием неприводной рабочей клетки в черновой группе мелкосортно-проволочного стана / С.М. Жучков, А.П. Лохматов, П.В. Токмаков, А.И. Лещенко // «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Сборник научных трудов ИЧМ НАН Украины, вып. 12. - Днепропетровск, 2006. – С. 198-203. 7. Деклараційний патент на корисну модель «Ділянка робочих клітей безперервного стану» № 13907, Україна МКВ<sup>7</sup> B21B13/00 / Токмаков П.В., Сокуренок А.В., Шеремет В.О. и др. Заявка № u 2005 10718 от 14.11.2005 Приоритет от 14.11.2005 Опубліковано 17.04.2006 Бюл.№ 4, 2006 - С. 5. 8. Токмаков П.В., Жучков С.М., Лохматов А.П. Использование неприводных рабочих клеток на мелкосортных и проволочных станах ОАО «МитталСтил Кривой Рог» // Металлургические процессы и оборудование - 2007. - №1. - С. 42-45. 9. Жучков С.М., Кулаков Л.В., Токмаков П.В. Разработка технологического комплекса для производства малотоннажных партий проката // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2004. - №4. – С. 26-27. 10. Пределы осуществимости процесса сортовой прокатки в трехочаговом прокатном модуле / С.М. Жучков, А.А. Горбанев, П.В. Токмаков и др. // «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Сборник научных трудов ИЧМ НАН Украины, вып. 9. - Днепропетровск, 2004. – С. 107-118. 11. Применение трехочагового прокатного модуля при производстве сортового проката / С.М. Жучков, П.В. Токмаков, А.А. Горбанев и др. // «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Сборник научных трудов ИЧМ НАН Украины, вып. 18. - Днепропетровск, 2008. – С. 155-163.

*ПУЗЫРЬ Р.Г.*, канд. техн. наук, КГПУ, г. Кременчуг  
*ДРАГОБЕЦКИЙ В.В.*, докт. техн. наук, проф. КГПУ, г. Кременчуг  
*МОСЬПАН Д.В.*, аспирант, КГПУ, г. Кременчуг  
*КОНДРАТЮК С.А.*, аспирант, КГПУ, г. Кременчуг

## **НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ТРАНСФОРМИРУЕМОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОФИЛИРОВАНИЯ ОБОДЬЕВ КОЛЕС**

Рассмотрен процесс радиально-ротационного профилирования сварных цилиндрических заготовок. Устранение разнотолщинности обода производится методом подбора схемы напряженно-деформированного состояния, которая существенно влияет на утонение в зонах радиусных закруглений готового изделия. Такой подход позволяет сократить количество трудоемких экспериментов, связанных с замером утонений и выявить наиболее приемлемый показатель напряженного состояния.

Ключевые слова: обод, колесо, радиально-ротационное профилирование, формоизменение, деформации, напряжения.

Розглянутий процес радіально-ротаційного профілювання зварених циліндричних заготовок. Усунення різної товщини ободу проводиться методом підбору схеми напружено-деформованого стану, котра істотно впливає на стоншення у зонах радіусних переходів готового виробу. Такий підхід дозволяє зменшити кількість складних експериментів, які пов'язані з замірами стоншень та виявити найбільш прийнятний показник напруженого стану.

Ключові слова: обід, колесо, радіально-ротаційне профілювання, формозміна, деформація, напруга.

The processing of radial-rotational profiling of welded cylindrical preparations is considered. The elimination different thickness of a rim is made by a trial and error method of the circuit is intense - is deformed condition, which essentially influences on thin zones in radius round of a ready product. Such approach allows to reduce quantity (amount) of the labour-consuming experiments connected to gauging thin zones and to reveal the most acceptable parameter of an intense condition.

Key words: wheel, radial-rotational profiling, forming, deformation, pressure.

### **1. Введение**

Особое место среди процессов производства изделий из сварных цилиндрических заготовок занимает радиально–ротационное профилирование и методы штамповки с совмещением формоизменяющих операций. В условиях серийного и массового производства ободьев колес метод радиально–ротационного профилирования является наиболее эффективным технологическим процессом.

Теория и технология радиально–ротационного профилирования и совмещенных процессов формоизменения интенсивно развиваются, что позволило за последнее десятилетие значительно усовершенствовать производство большой номенклатуры изделий из сварных цилиндрических заготовок, разработать новые виды оборудования, технологической оснастки и инструментов.

### **2. Постановка проблемы**

Сдерживающим фактором дальнейшего развития и использования прогрессивных технологий формоизменения является предшествующая разрушению локализация деформаций. На интенсивность деформаций, предшествующих разрушению, наиболее существенное влияние оказывает схема напряженно–деформированного со-

стояния и механических характеристик менее и более деформированных частей заготовки. Неравномерность развития деформации нельзя не учитывать при создании и совершенствовании оборудования и процессов формообразования деталей из сварных цилиндрических заготовок.

С учетом вышеизложенного, актуальной задачей является совершенствование технологии формоизменения сварных цилиндрических заготовок путем подбора рациональной схемы напряженно–деформированного состояния. Это позволит повысить точность расчета предельной степени формоизменения и объективность рекомендаций при проектировании технологии и оборудования.

При выборе и проектировании процесса изготовления ободьев колес необходимо по известной конфигурации детали выбрать метод формоизменения заготовки. Среди методов изготовления наиболее прогрессивным в настоящее время является методы локального деформирования, радиально–ротационного профилирования, обкатка, ротационная раздача, раскатка, формоизменение качающейся матрицей.

Производственный опыт показывает, что использование методов обкатки, раскатки и формоизменения качающейся матрицей при изготовлении ободьев колес может привести к интенсивному износу деформирующего инструмента, ямочному отрыву и формированию бороздчатого рельефа.

Процесс радиально–ротационного профилирования обеспечивает необходимое качество ободьев колес, однако, для повышения конкурентоспособности продукции остро стоит вопрос снижения разнотолщинности обода колеса. Для обеспечения минимальной разнотолщинности обода колеса необходимо выбрать схему профилирования, а именно, число и конфигурацию переходов, размеры заготовки. Не менее важным в этом вопросе является определение пластической устойчивости материала заготовки в опасных зонах при ограничениях, накладываемых на процесс геометрическими, технологическими, прочностными и конструктивными факторами.

На характер развития деформаций и на пластичность материала заготовки наибольшее влияние оказывает схема напряженного состояния и монотонность деформации. Особенно это проявляется, если заготовка содержит локальные зоны повышенной или пониженной пластичности.

В данном исследовании необходимо выбрать наиболее эффективную схему формоизменения обода колеса, обеспечивающую минимальную разнотолщинность и отсутствие локализации деформаций. Наибольшее утонение обода достигается в радиусных зонах. Радиусные зоны (переходы) оформляются при изгибе. Утонение материала непосредственно зависит от минимально допустимого радиуса изгиба. Наиболее эффективным способом уменьшения допустимого радиуса изгиба в холодном состоянии является создание благоприятной схемы напряженного состояния. Такой подход позволяет сократить количество трудоемких экспериментов, связанных с замером утонений и выявить наиболее приемлемый показатель напряженного состояния.

Создание более благоприятной схемы напряженного состояния в производственных условиях возможно путем создания дополнительного очага деформаций. Возможные схемы процесса (рис. 1):

- изгиб с дополнительным нагружением заготовки в тангенциальном направлении;
- изгиб с дополнительным нагружением заготовки в радиальном направлении;

- изгиб с дополнительным нагружением заготовки в меридиональном направлении;
- комбинированное и последовательное нагружение;

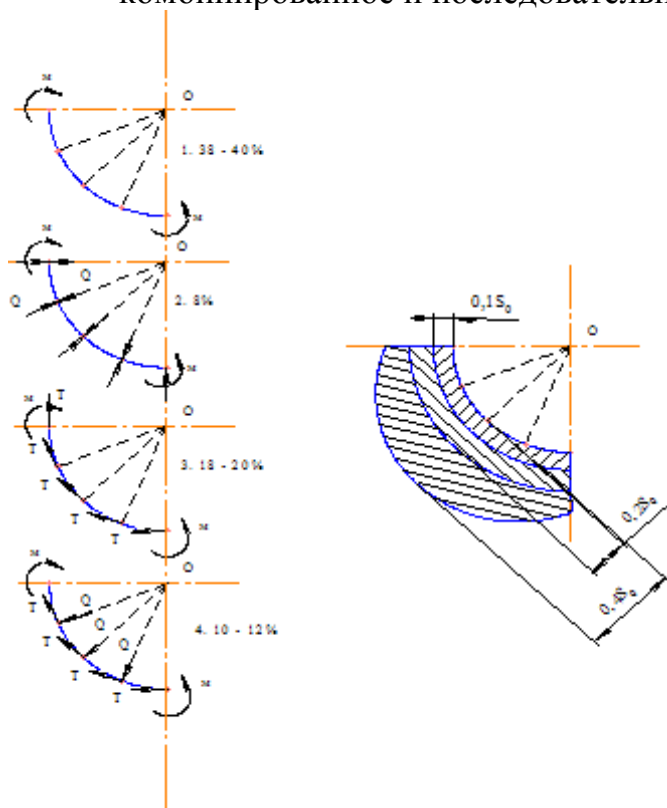


Рис. 1. Схемы изгиба с созданием дополнительного очага деформации

напряжения  $\sigma_z \approx 0,5\sigma_\varphi$ , действующие вдоль ребра изгиба.

Как правило, локализация деформаций перед разрушением не происходит. Только в некоторых случаях на наружных поверхностях возникает локализация так называемая "апельсиновая корочка". Влияние менее деформированных участков не сказывается на процессе формоизменения. Однако утонение достигает больших значений.

При гибке заготовки силой с внутренней поверхности находящейся в контакте с инструментом, возникает контактное напряжение  $f$ , которое приводит к смещению нейтрального слоя. При этом предельный радиус изгиба уменьшается до углов  $\alpha = 60 - 70^\circ$ .

При изгибе с дополнительным нагружением заготовки в тангенциальном направлении происходит смещение нейтрального слоя по направлению к наружной поверхности. Создание сжимающих напряжений в тангенциальном направлении позволяет уменьшить допустимое значение изгиба и практически исключает разнотолщинность.

Однако в зоне передачи усилия возможна потеря устойчивости, т.е. максимальное значение напряжения, которое можно дополнительно создать в очаге деформаций необходимо ограничить и локализовать деформации, которые при таком нагружении происходят.

К последним схемам относим: нагружение в последовательности "радиальное сжатие – изгиб"; "изгиб – радиальное сжатие"; изгиб – осевое сжатие; растяжение – изгиб (р–и); изгиб – растяжение – изгиб (и–р–и); растяжение + изгиб (р+и); изгиб +сжатие (и+с); сжатие – изгиб (с–и); изгиб – сжатие – изгиб (и–с–и) и т.д.

Среди способов уменьшения разнотолщинности детали при формоизменении является: формовка при переменном нагружении заготовки вдоль образующей; предварительное изменения профиля радиальных сечений заготовки.

Проведем анализ процессов гибки. При гибке широкой заготовки моментом, на наружных и внутренних поверхностях в местах изгиба контактные напряжения отсутствуют. На наружной поверхности возникают растягивающие тангенциальные

Изгиб с дополнительным нагружением заготовки в радиальном направлении позволяет уменьшить значения радиуса изгиба и разнотолщинность в очаге деформаций при создании дополнительного сжатия на выпуклой поверхности заготовки. Радиальное сжатие положительно влияет на возможность процесса изгиба. Утонение заготовки не превышает 10% от минимального радиуса изгиба. Для малоуглеродистой стали удастся уменьшить в 1,8–2,1 раза. При этом следует учитывать положительное влияние радиального сжатия на околошовную зону и то, что заготовка должна быть разгружена от изгибающего момента, а затем радиального усилия.

При обратной последовательности происходит образование трещин и хрупкое разрушение заготовки при предельно допустимых радиусах изгиба.

При нагружении в последовательности "радиальное сжатие – изгиб" заготовка предварительно сжимается в направлении перпендикулярном ее поверхности, а затем изгибается на требуемый угол. С увеличением радиальной сжимающей нагрузки минимальный радиус изгиба уменьшается примерно также, как и в предыдущем случае. Абсолютные значения утонения при погонной нагрузке (отношения давления ролика к площади поверхности контакта) не превышает 0,08 или до 8 %.

Следующая схема нагружения "изгиб – радиальное сжатие". В этом случае заготовка первоначально изгибается на заданный радиус, а затем сжимается в радиальном направлении. Процесс сопровождается утонением материала в зоне гибки. Последующее радиальное сжатие сопровождается дополнительным утонением. Относительное значение утонения колеблется от 0,07 или до 7 % в зависимости от нагрузки.

Возможны еще три схемы последовательного нагружения:

- растяжение – изгиб (р–и). Цилиндрическая заготовка перед профилированием подвергается раздаче;
- изгиб – растяжение – изгиб (и–р–и);
- растяжение + изгиб (р+и). В этом случае нагружение заготовки производится одновременно.

Предварительная раздача или осадка заготовки позволяет в дальнейшем уменьшить изгибающий момент и практически устраняет локализацию процесса разрушения. Максимальное увеличение утонения при удельной осевой нагрузке равной 0,65 составляет примерно 1–2 % по сравнению с обычной гибкой.

В заключении рассмотрим изгиб с осевым сжатием, т.е. предварительное обжатие цилиндрической заготовки. С точки зрения реализации этого процесса сравнительно легко осуществить при радиально–ротационном профилировании. По сравнению с обычной гибкой обжатие заготовки увеличивает деформацию удлинения выпуклой поверхности и смещает действительную нейтральную поверхность в направлении к центру кривизны. При всех возможных схемах изгиба со сжатием изменение толщины не значительно, а увеличения изгибающего момента значительное, порядка 2–3 раз.

Таким образом, наиболее приемлемой схемой изгиба при радиально–ротационном профилировании является растяжение – изгиб (р–и) и сжатие на выпуклой поверхности изгиба. В этом случае разнотолщинность детали минимальна, величина деформирующих усилий в 2–3 раза меньше чем при изгибе с осевым сжатием, локализации деформаций не происходит.

Рассмотрим основные схемы профилирования ободьев колес с точки зрения обеспечения разнотолщинности и отсутствия локализации деформаций.

Основные схемы профилирования: гибка формовка; гибка отбортовка; раздача с обжимом (краевые участки подвергаются тангенциальному растяжению, а элементы ручья укорочению); ротационная раздача; радиально–осевое ротационное профилирование; радиально–ротационное профилирование (РРП) при маятниковом покачивании и сдавливании профилируемой оболочкой; РРП с разводящими по горизонтальной оси роликами; РТР с обжимом, обжимом с подпором, отбортовкой и закаткой; РТР с набором металла.

Часть из этих схем приведена на рис. 2. Наиболее приемлемой из существующих схем профилирования является схема процесса изготовления ободьев колес, которая выполняется по методу радиально–осевого ротационного профилирования.

По этому методу профиль обода образуется путем обкатывания внутренней поверхности цилиндрической обечайки вращающейся головкой, снабженной обкатными профилировочными роликами и путем использования осевого подпора в перемещающемся очаге деформации. Максимальное утонение в этом случае не превышает 12 %. Во всех остальных методах утонение даже при использовании интенсифицирующих факторов лежит в пределах 18–22 %. Даже попытка уменьшить утонения путем набора металла и последующего спрямления ручья оказалась не эффективной. Избыточный материал распределяется на прямолинейном участке.

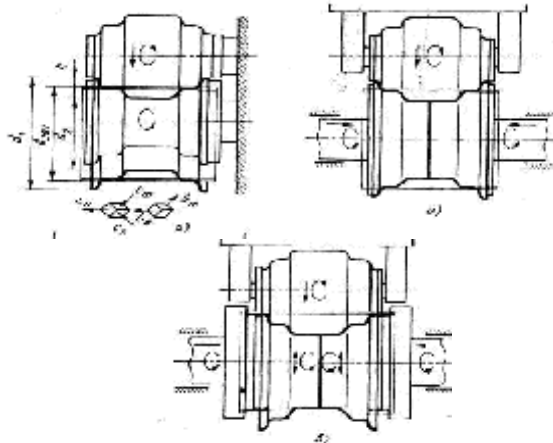
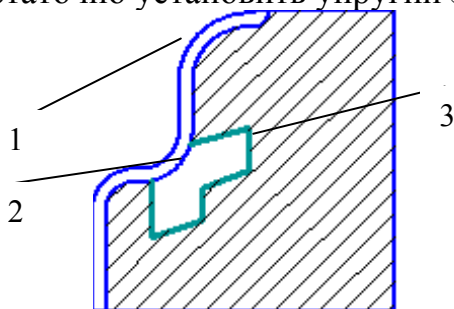


Рис. 2. Схемы изготовления ободьев на станках радиального профилирования а – консольное расположение рабочих профилирующих роликов; б, в – проходное расположение рабочих профилирующих роликов

При радиально–осевом ротационном профилировании прямолинейный участок свободен от нагружения и не препятствует перетеканию материала в периферийные участки оболочки. Причем радиусы изгиба 1 получены с радиальным подпором с выпуклой стороны изгиба. Для создания радиального подпора на радиусе 2 достаточно установить упругий элемент 3 (рис. 3).



Наибольшая равномерная деформация листовой заготовки (минимальное утонение, отсутствие локализации деформаций) достигается в процессах пластического формоизменения, при

$$m = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1 [2], \text{ где } \sigma_2, \sigma_1 - \text{главные нормальные}$$

напряжения. Это соответствует равномерному двухосному растяжению. Из всех рассмотренных процессов профилирования ближе к равномерно-

Рис. 3. Радиально–осевое ротационное профилирование с радиальным подпором

му двухосному растяжению радиально–осевой процесс.

При формоизменении обода колеса 4,5 Е–16 из

1,2 – радиусы изгиба; 3 – упругий элемент

листовой стали 0,8 ПС толщиной 3,5 мм из заготовки размерами  $184 \pm 1 \times 1240 \pm 2$  показатель упрочнения материала  $n = 0,22 - 0,25$ , предел текучести и временное сопротивление соответствовало стандартам. Деталь полученная методом РРП имеет максимальное утонение в местах радиусных переходов центрального ручья – 18–20%; 12–14%; 38–40%. Дно центрального ручья утолщается на 5–7%. При радиально осевой раздаче (РР) утонения в радиусных переходах не превышает 10–12 %. При этом происходит утонение дна центрального ручья на 3–5 %. Это связано с отсутствием радиальных деформирующих усилий, что обеспечивают свободное течение металла в краевые зоны. В качестве оценки локального деформированного состояния использовался критерий А.Д. Томленова -  $\eta$  [2].

Для сравниваемых процессов при напряженных состояниях определяемых коэффициентом  $m$ , получили  $m = -0,88$ ,  $\eta = 0,92$ ; для РР  $m = 0,92$ ,  $\eta = 0,63$ ; т.е. процесс РР имеет значительный резерв пластичности и сохранения сплошности сварного шва и околошовной зоны.

Не менее эффективно трансформируемое устройство для радиально ротационного профилирования ( рис. 4).

Устройство содержит внутренние ролики, посаженные на горизонтальные валы, которые имеют встречное осевое движение и три наружных – радиальных движения.

На первых и вторых профилирующих поверхностях наружных роликов размещены сегменты высотой не меньше 0,2 толщины заготовки, на первом в форме равностороннего треугольника, на втором – равнобедренной трапеции. Кроме этого, между наружными роликами установлены не менее трех калибровочных роликов, оси которых шарнирно соединены между собой и осями наружных роликов коромыслами, что дает возможность радиального перемещения.

Устройство состоит из внутренних роликов 1 и 2, между ними помещается заготовка. Ролики 1,2 посажены на горизонтальные валы 4. Радиальное движение выполняют наружные ролики 5, 6, 7. На рабочих поверхностях роликов 5 и 6 размещены сегменты в форме равностороннего треугольника 8, на ролике 5 - в форме равнобедренной трапеции 9, на роликах 6 и 7 - профилирующая поверхность гладкая. Высота сегментов 8, 9 равняется 0,2-0,3 от толщины заготовки.

Между профилирующими наружными роликами 5, 6, 7 установлены, как минимум, три наружных калибрующих ролика 10, 11, 12.

Профилирующие ролики соединяются шарнирно с коромыслами 13 и калибрующими роликами 10, 12. Калибрующие ролики 11 соединяются шарнирно с коромыслами 14 и центральным калибрующим роликом.

Работа устройства для радиально-ротационного профилирования с равномерным размещением по периметру зон деформаций происходит следующем образом.

Боковые кромки заготовки 3, которые охватываются внутренними роликами 2 и 1 фиксируются под ними. Внутренние ролики 1,2 сближаются, выпучиваются и разбортовывают краевые элементы заготовки 3, а наружные 5, 6, 7 профилируют их.

Наличие сегментов обеспечивает образование распирающих усилий от центральных частей заготовки к зоне радиусных переходов.

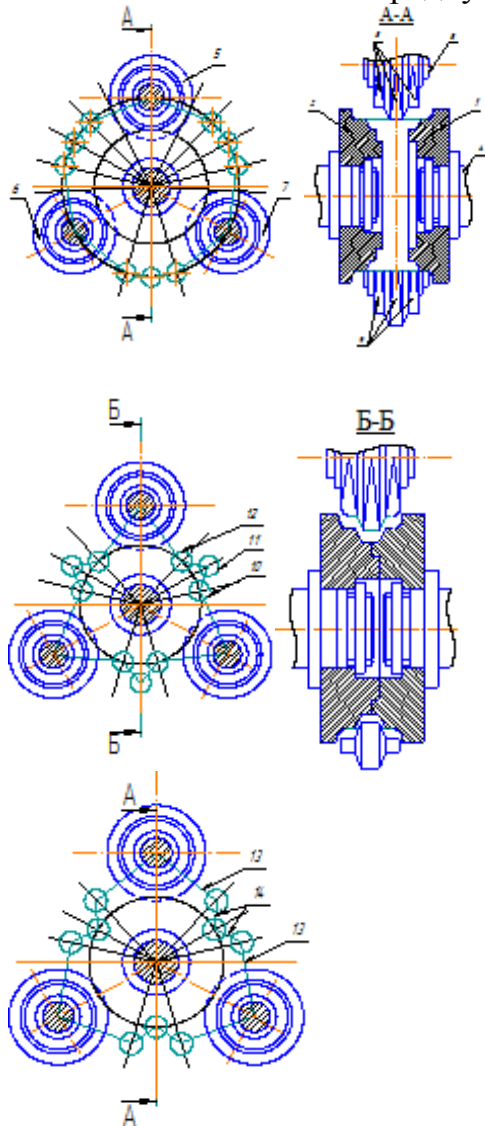


Рис. 4. Устройство для радиально-ротационного профилирования

выпуклой стороны на дно центрального ручья. Такая схема реализуется в методе радиально-осевого ротационного профилирования. Применяв этот метод, достигаем разнотолщинность, не превышающую 10–12%.

**Список литературы:** 1. Ершов В.И. и др. Совершенствование формоизменяющих операций листовой штамповки. – М.: Машиностроение, 1990. – 312 с. 2. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов. – М.: Металлургия, 1972. – 480 с.

**УДК 621.771.26**

**БИЛЛЕР В.В.**, канд. техн. наук, нач. группы прокатного отдела, УкрГНТЦ «Энергосталь», г. Харьков

**ПОПОВ А.В.**, инженер прокатного отдела, УкрГНТЦ «Энергосталь», г. Харьков  
**СОЗДАНИЕ ПЕРВОГО В УКРАИНЕ БАЛОЧНОГО СТАНА**

Изложена цель, объём и результаты реконструкции рельсобалочного стана на ОАО «Днепро-ский меткомбинат». Освещены этапы реконструкции. Дано краткое описание технологии производства балок больших размеров с параллельными полками.

Ключевые слова: прокатный стан, прокатка, универсальный балочный стан, рельсобалочный цех, шпунт «ларссена», «собачья кость», широкополочная балка, универсальная клеть

Викладено мету, обсяг і результати реконструкції рейкобалкового стану на ВАТ «Дніпро-вський меткомбінат». Висвітлені етапи реконструкції. Дано короткий опис технології вироб-ництва балок великих розмірів з паралельними полками.

Ключові слова: прокатний стан, прокатка, універсальний балковий стан, рейкобалковий цех, шпунт «ларссена», «собача кістка», широкополкова балка, універсальна кліть

The objective, scope and results of the reconstruction of rail and beam mill at JSC "Dniprovskyi Steel" are presented. The reconstruction phases are illuminated. A short description of the production technology of large size beams with parallel flanges are showed.

Keywords: rolling mill, rolling, universal beam mill, rail and beam shop, shpunt «larssen», «dog bone», wide-flange beam, universal stand

### **1.1 Целесообразность и техническая возможность строительства**

Целью работы любого предприятия в условиях рыночной экономики является производство востребованной продукции, причем продукции высокого качества, конкурентноспособной и дающей возможность предприятию гарантированной перспективы долговременной стабильной работы с высокой эффективностью. Такими профилями, несомненно, являются балки с параллельными полками больших номеров (с высотой стенки ~900 мм) и шпунты с широкой межзамковой базой (~ 750 мм).

В настоящее время балки такого сортамента производятся только на универсально–балочном стане в г. Нижний Тагил (УБС НТМК), расположенном в России. Однако потребность в балках больших номеров за счёт одного стана остается не удовлетворенной.

Основными предпосылками при выборе металлургического комбината для осуществления строительства нового балочного стана с годовым производством до 1,0 млн т товарного проката в год являются:

- наличие непрерывно-литой заготовки после реконструкции ОНЛЗ в конвертерном цехе с установкой сортовой и слябовой МНЛЗ для обеспечения требуемой производительности цеха;
- наличие площадей для возможности осуществления строительства;
- наличие необходимой инфраструктуры;
- наличие высококвалифицированных специалистов;
- возможность приобретения и использования металлургического оборудования, отвечающего современным требованиям.

Таким требованиям отвечает ОАО «Днепроровский металлургический комбинат имени Ф.Э. Дзержинского», (ОАО ДМКД) г. Днепродзержинск

Для получения балок требуемого сортамента в условиях ОАО ДМКД рассматривалась (как вариант) возможность применить известную схему прокатки, используемую на УБС НТМК. Применяемая там реверсивная схема прокатки предусматривает получение балок из фасонной литой заготовки прокаткой в обжимной клети с последующей ее прокаткой в отдельно установленных трех группах клетей: черновой, промежуточной (предчистовой) и чистовой, что позволяет в отличие от прокатки на непрерывных станах уменьшить необходимое количество прокатных клетей и соответственно уменьшить площадь и длину станového пролета для их установки. При этом каждая группа имеет в своем составе универсальную 4-х валковую клеть

(для обжатия стенки и полки балки) и вспомогательную двухвалковую клеть (для обжатия полки балки по высоте).

При этом, в отличие от схемы УБС НТМК, рассматривался вариант выполнения установки этих трех групп клеток комбинированно-линейно. При этом принималось за основу существующее линейное расположение прокатных клеток в станом пролете РБЦ. Требовалось только заменить существующие клетки две трио рельсобалочного стана новыми двумя парами клеток, причем каждая пара должна иметь как обычную клеть дуо, так и универсальную. В качестве чистовой клетки предусматривалось использовать обычную нереверсивную клеть дуо. При такой реконструкции сохраняется специализация стана и возможность расположения всех прокатных клеток в существующий становой пролет. Использование такой схемы расположения предполагало также применить существующий блюминг РБЦ в качестве обжимной клетки балочного стана и тем самым уменьшить объемы, стоимость и сроки реконструкции.

УБС НТМК работает на фасонной заготовке, а РБЦ на слитках. Поэтому для производства балок такого сортамента по разработанной схеме расположения оборудования (прокатных клеток) основным условием является обеспечение стана фасонной заготовкой типа «собачья кость» получаемой на машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) с последующим ее нагревом в нагревательной печи и прокаткой на стане. Предполагаемый сортament нового балочного стана потребует применения двух типоразмеров литой фасонной заготовки.

Отсутствие обеспечения нового балочного стана требуемой фасонной литой заготовкой и послужило основным препятствием в использовании вышеуказанной схемы, поскольку при этом требуется установка дополнительной обжимной блюминговой клетки и вся схема расположения оборудования балочного стана с установкой в существующем станом пролете РБЦ не вписывается.

Поэтому решено создать новый балочный стан с другой компоновкой расположения основного оборудования. В состав такого стана также должны входить три группы клеток: обжимная, черновая и чистовая. Обжимная группа должна состоять из двух обжимных блюминговых клеток дуо. В качестве черновой группы решено использовать зарубежный опыт, установив три клетки (реверсивная группа U-E-U), в состав которой входят две универсальные клетки и одна обычная - дуо. Чистовая группа выполняется двухклетьевой, причем вторая (по ходу прокатки) клеть группы универсальная. Разработанная схема расположения оборудования была разработана специалистами УкрГНТЦ «Энергосталь», согласована на комбинате и принята за основу фирмой поставщиком оборудования - SIEMENS VAI. Схема расположения основного оборудования балочного стана предусматривает его создание на площадях РБЦ.

## **1.2 Основные этапы реконструкции**

Реконструкцию рельсобалочного цеха намечалось осуществить в два этапа: доостановочный и остановочный. Выполнение доостановочного этапа предусматривало проведение реконструктивных мероприятий по установке балочного стана без остановки производства в существующем РБЦ. Выполнение остановочного этапа предполагало его полную остановку производства в существующем рельсобалочном цехе.

Первый этап реконструкции рельсобалочного цеха включал в себя следующий перечень основных реконструктивных мероприятий:

- реконструкцию существующего здания и пристраивание дополнительного третьего западного продольного пролета для увеличения площади склада исходной заготовки;
- пристройку с южной стороны пролета нового дополнительного пролета – для размещения нагревательной печи, загрузочного оборудования и расширения склада заготовок;
- устройство железобетонных фундаментов под оборудование печного участка с монтажом всего печного оборудования;
- устройство фундаментов на участке будущих черновой и чистовой групп прокатных клетей с последующим их монтажом в комплексе с их электроприводами и межклетьевыми рольгангами;
- организацию нового продольного пролета для склада валков;
- монтаж оборудования стационарных рольгангов отделки, станции формирования слоев, подвижного упора, пил холодной резки, устройства сбора обрезки;
- строительство оборотного цикла водоснабжения.

Второй этап реконструкции рельсобалочного цеха включал в себя следующий перечень реконструктивных мероприятий:

- демонтаж всего существующего оборудования рельсобалочного цеха (кроме рабочей клетки блюминга 1050);
- реконструкцию здания цеха по результатам обследования ООО «Стальпром»;
- монтаж оборудования балочного стана, не вошедшего в первый этап реконструкции;
- подвод и подключение всех энергокоммуникаций;
- холодное и горячее опробывание.

### 1.3 Производственная программа и сортамент

Программа производства и сортамент прокатных станов после реконструкции по очередям приведен в таблице 1.

В таблице 1 приведен расчетный сортамент стана, обеспечивающий общую производительность цеха 1,0 млн т/год.

Таблица 1

Сортамент готовой продукции балочного стана

| Профиль                               | Размер, мм | Годовой выпуск, тыс. т/год |
|---------------------------------------|------------|----------------------------|
| 1 Балка с широкой полкой (HEA, HEB)   | 160...400  | 300                        |
| 2 Балка с параллельными полками (IPE) | 160...600  | 128                        |
| 3 Балка с параллельными полками (IPB) | 450...900  | 185                        |
| 4 Балка с уклонами полок (IPN)        | 160...600  | 128                        |
| 5 Уголок                              | 140...240  | 28                         |
| 6 Швеллер                             | 160...400  | 85                         |
| 7 Шпунтовый профиль                   | 400...750  | 146                        |
| <b>Итого:</b>                         |            | <b>1000</b>                |

Готовый прокат поставляется длиной от 6 до 24 м.

Качество и технические показатели проката, производимого в балочном цехе после реконструкции должны полностью удовлетворять требованиям ДСТУ и Международным стандартам (DIN и Euronorm).

#### **1.4 Технология прокатки на новом балочном стане**

Заготовки поступают с МНЛЗ на специальных железнодорожных платформах грузоподъемностью 70 т. Поступив на склад, заготовки с помощью электромостовых кранов укладываются в штабели крест-на-крест.

Для складирования заготовки предусматривается строительство нового пролета.

Со склада заготовки с помощью рольганга направляются в нагревательную печь с шагающими балками. В процессе поступления в печь, заготовки проходят через считывающее устройство для распознавания основных параметров с последующей передачей этой информации в общецеховую АСУ для учёта в работе по сопровождению данной заготовки по всей технологической цепочке вплоть до навешивания бирок.

Максимальная производительность печи 230 т/ч по холодному всаду.

Нагретые заготовки до температуры 1100 – 1250 °С выдаются из печи для прокатки. На выходе из печи размещается установка для гидросбива окалины водой высокого давления.

Преимущество такой операции заключается в улучшении качества поверхности готовой продукции и в повышении срока службы калибров первых клетей.

Очищенные от окалины заготовки направляются к существующей обжимной клетке 1050.

Обжимная группа состоит из существующей двухвалковой клетки 1050 и новой горизонтальной дуо реверсивной обжимной клетки. В ней будет прокатываться весь металл, поступающий в последующем в черновую группу клетей для производства заготовок, балок или специальных профилей.

Передаточный рольганг установлен за обжимной клетью для обеспечения передачи раската во вторую, обжимную клетку.

Трехклетевая черновая реверсивная группа (группа U-E-U) имеет в своем составе две универсальные клетки и одну горизонтальную клетку.

Прокатка в черновой группе клетей проходит с контролем минимального натяжения и контролем петли при работе без натяжения. Схемы калибровки для всех видов продукции оптимизированы.

Чистовая группа (группа E – U) имеет в своем составе одну универсальную клетку и одну горизонтальную клетку дуо.

Универсальные клетки могут работать как двухвалковые горизонтальные клетки и как универсальные клетки с горизонтальными и вертикальными (холостыми) валками. Клетка может перемещаться по горизонтали для поддержания фиксированной линии прокатки, если она используется как двухвалковая клетка. Горизонтальные валки снабжены роликовыми подшипниками и двухрядными упорными подшипниками. Все подшипники рассчитаны на интенсивную эксплуатацию. Неприводные вертикальные валки монтируются на конических роликовых подшипниках. Подушки горизонтальных валков являются плавающими для корректного распределения нагрузки на подшипники в целях продления срока их службы. Специальная система балансировки устраняет биение и создает предварительную нагрузку на резьбу нажимных винтов.

В проекте для стана выбрано всего три типа клетей, что позволяет минимизировать запасы валков и проводок.

Для быстрой перевалки валков используются специальные «роботы», что позволяет снизить потребность в дорогостоящих запчастях и резервном оборудовании. Быстрая замена изношенных валков на вновь переточенные происходит за пределами стана на специальном роботизированном участке. Эта система позволяет ограничить потребность, в мостовых кранах на участке перевалки клетей.

Профиль балки производится с использованием обжимного стана для обеспечения наиболее подходящего фасонного сечения для последующей прокатки в черновой универсальной реверсивной группе клетей. В зависимости от конечного профиля подкат будет прокатываться в 3...7 проходов на существующей черновой клети для минимизации перевалки валков на этой клети. Затем заготовка прокатывается в 3...9 проходов во второй обжимной клети для подготовки его к прокатке в 3 или 5 циклов в черновой (для него чистовой) группе стана. Во время прокатки зазор в клетях будет регулироваться автоматически для соблюдения схемы прокатки. Прокатка завершается в последней универсальной чистовой клети с фиксированным зазором, после чего выдается на холодильник. Скорость прокатки балки до 7 м/с.

Уголки можно прокатывать так же, как балку используя универсальные клети в горизонтальной конфигурации.

Швеллеры можно прокатывать так же, как балки, используя универсальные клети в горизонтальной или универсальной конфигурации.

Шпунты «Ларсена» прокатываются в горизонтальной конфигурации клетей.

На выходе чистовой клети установлена система контроля профиля. Она работает по технологии лазерной триангуляции и обработки изображения и выполняет непрерывное измерение геометрии проката в потоке в целях соблюдения строгих допусков для готовой продукции. Система контроля профиля имеет обратную связь с цеховой системой АСУ для своевременного принятия решений по изменению раствора валков в случае такой необходимости (например, выходом размеров готового профиля за поле допусков при выработке калибров). Это обеспечит уникальную настройку чистовой клети в реальном времени на следующую штуку без задержки процесса, повышая, таким образом, коэффициент использования оборудования стана, в особенности, после смены профиля. К тому же, система позволит операторам быстро выявлять и решать любые проблемы в процессе прокатки, а также упростить процедуру настройки стана. После выхода профиля из чистовой группы, он передается на пилу холодной резки для обрезки заднего конца, которым будет осуществляться задача в роликотправильную машину (РПМ). При этом работа ножниц программируется и оптимизируется в зависимости от товарной длины конечной продукции.

После обрезки прокат по рольгангу направляется на холодильник, где балки будут укладываться на стационарные и подвижные рейки с плоской поверхностью. Предусмотрено естественное охлаждение балок воздухом, проходящим через холодильник, а также оросительное водяное охлаждение.

После холодильника прокат подвергается правке в РПМ. Один или два профиля, поступающие с холодильника, выпрямляются по всей длине в правильной машине.

Затем прокат перемещается на цепной шлеппер, формируется слой с заранее определенным количеством прутков. Сформированный слой передаётся на дисковые пилы.

Две пилы холодной резки (металлические) расположены на участке резки за рольгангом на выходе цепного шлеппера и служат для отрезания головного и хвостового концов проката, а также для резки на товарную длину. Одна пила неподвижна, а другая подвижна, причем пила перемещается по горизонтали и осуществляет маятниковое движение. Режущие диски выполнены из металла.

После резки на пилах прокат по рольгангу поступает на штабелировщик, состоящий из четырех основных участков. На первом участке подъемный цепной шлеппер снимает слой проката с рольганга. На втором - фиксированный цепной шлеппер перемещает слой на участок подготовки слоев. На третьем - цепным шлеппером формируется слой - отбирается нужное количество штук для пачки. На четвертом участке находятся магнитные головки, которые перемещают слой с цепного шлеппера в штабелирующее устройство, и после того, как пачка будет сформирована, она будет передана на выходной рольганг.

Сформированная пачка поступает на автоматический участок обвязки, где с помощью автоматических обвязочных машин (их четыре) обвязывается, и затем передается на весовую станцию, где на пачку навешивается бирка. После взвешивания пачки помещаются на устройство уборки и передаются на площадку хранения. Затем пачки перемещаются электромостовыми кранами для отгрузки в железнодорожные вагоны.

Таким образом, строительство нового балочного стана позволит:

- впервые в Украине организовать производство дефицитных балок больших размеров;
- расширить существующий сортамент металлопроката;
- достигнуть высокой производительности при относительно низких капитальных вложениях;
- получить качественный сортовой прокат – балку с параллельными полками больших номеров, а также шпунт с большой базой;
- снизить удельные расходы энергоносителей на получение товарной продукции.

**Список литературы:** 1. Прокатные станы. Справочник. В 3-х томах. Т.1. Обжимные, заготовочные и сортопрокатные станы 500 – 950 / *Под ред. В.Г. Антипина.* – М. :«Металлургия», 1992.-432с. 2. Технология прокатного производства. Справочник в 2-х книгах. Кн.1. / *Под ред. В.И. Зюзина* М. :«Металлургия», 1991.-440 с. 3. Технология прокатного производства. Справочник в 2-х книгах. Кн.2. / *Под ред. В.И. Зюзина* М. :«Металлургия», 1991.-423 с.

**УДК 621.771**

**В.С. АРИХ**, начальник прокатного отдела, УкрГНТЦ «Энергосталь», г. Харьков

**В.Ю. КУЛАК**, начальник группы прокатного отдела, УкрГНТЦ «Энергосталь», г. Харьков

## **РАЗВИТИЕ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Приведены современные технологии энерго- и ресурсосбережения при прокатке. Освещены вопросы технического перевооружения предприятий на основе достижений научно-технического

прогресса. Описаны внедренные энергосберегающие мероприятия при строительстве новых и реконструкции существующих прокатных цехов.

Ключевые слова: энерго- и ресурсосбережение, прокатка, выход годного, производительность, валок, печь.

Наведені сучасні технології енерго- і ресурсозбереження при прокатці. Висвітлені питання технічного переозброєння підприємств на основі досягнень науково-технічного прогресу. Описані запроваджені енергозберігаючі заходи при будівництві нових та реконструкції існуючих прокатних цехів.

Ключові слова: енерго- та ресурсозбереження, прокатка, вихід придатного, продуктивність, валок, піч.

Modern technologies of energy-saving and resource-saving when rolling are presented. Technical issues of enterprises re-equipment on the basis of scientific and technological progress are illuminated. The energy saving measures implemented during the construction of new and reconstruction of existing rolling mills are described.

Key words: energy and resource saving, rolling, yield, productivity, roll, furnace.

Прокатное производство предлагается развивать в направлении расширения марочного сортамента и организации производства новых видов металлопродукции, которые в настоящее время в Украине не производятся, либо производятся в недостаточном количестве [2].

В первую очередь это касается производства тонколистовой стали – как горячекатаной, так и холоднокатаной, в т. ч. с покрытиями из жести, особо тонкой, калиброванной стали, метизов и др.

Для реализации программ по расширению сортамента и структурных изменений в прокатном производстве необходимо провести техническое перевооружение на основе достижений научно-технического прогресса с использованием передового отечественного и зарубежного опыта. Осуществить это планируется за счет реконструкции ряда станков, вывода из эксплуатации морально устаревших и физически изношенных агрегатов с внедрением ряда новых технологических процессов и оборудования, которые получили широкое распространение в мировой практике – в первую очередь это строительство литейно-прокатных комплексов. Перспектива развития чёрной металлургии Украины в целом и прокатного производства в частности в значительной мере будет зависеть от возможностей обеспечения её энергоресурсами. Анализ энергопотребления в существующих условиях показывает рост удельных расходов энергоресурсов на тонну готового проката за счет сниженных объемов производства.

На современных машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) выход годного составляет до 98,5 %, что снижает расходный коэффициент металла на 12–18 % по сравнению с разливкой стали в изложницы. Полный перевод на непрерывно-литую заготовку позволит вывести из эксплуатации энергоемкие агрегаты в составе 10 блюмингов, 2 слябингов и 6 заготовочных станков [1], что в сумме составляет более 100 тыс. т технологического оборудования. В связи с этим, существенно снизится потребление воды, идущей на смыв окалины, охлаждение и т. д.

В условиях энергетического кризиса, растущие цены на энергоносители требуют, наряду с техническим перевооружением, решения задач энергосбережения.

При строительстве новых и реконструкции существующих прокатных цехов на многих заводах внедряются следующие энергосберегающие мероприятия:

- переход на непрерывно-литую заготовку, что обеспечит повышение выхода годного и снижение энергозатрат на 160–170 кг условного топлива на тонну проката;

- снижение расхода топлива на 30–40 % при внедрении горячего посада в нагревательные печи станов;
- использование тепла прокатного нагрева для термообработки в потоке стана;
- совмещение процессов травления и холодной прокатки, обеспечивающие экономию электроэнергии до 5 %;
- совмещение процессов непрерывной разливки на МНЛЗ и прокатки в едином комплексе с использованием тонких слябов (литейно-прокатные агрегаты) позволит снизить расход топлива до 60 % и до 25 % экономию электроэнергии по сравнению с традиционными технологиями;
- снижение расхода топлива за счет использования энергосберегающих мероприятий по нагревательным устройствам прокатных станов, в том числе на вновь проектируемых станах, использующих современные высокопроизводительные нагревательные печи с шагающими балками (шагающим подом), позволит сократить удельные расходы тепла в 1,3–1,5 раза по сравнению с действующими печами;
- основной парк нагревательных толкательных печей Украины (до 80 %) построен в 1950–1960 гг. и требует глубокой реконструкции: применением новых видов огнеупоров и изоляционных материалов, установкой «теплых рейтеров» на подовые трубы с испарительным охлаждением, установкой современных сжигательных устройств, автоматизацией процессов сжигания и нагрева металла и др., что снизит расход топлива до 20–25 %;
- ряд нагревательных печей работают без «утилизационных установок» (отходящие газы с температурой 700–800 °С направляются в дымовую трубу); установка металлических петлевых рекуператоров для подогрева воздуха дает экономию топлива до 15 %;
- внедрение АСУ ТП нагрева металла;
- оборудование для передачи литых заготовок от МНЛЗ до печи прокатного стана, а также при больших расстояниях от печи до первой клетки прокатного стана должно обеспечивать максимальное сохранение тепла и др.

Многие энергосберегающие мероприятия находят практическую реализацию в проектах УкрГНТЦ «Энергосталь» НИПИМП «Гипросталь».

На ОАО «Алчевский металлургический комбинат» после проведения реконструктивных мероприятий на стане 2800 (теперь стан 3000) намечено производство штрипса для нефтегазопроводных труб и судостали в объеме 400 тыс. т/год по контролируемым режимам прокатки [3], что позволяет снизить температуру нагрева металла в нагревательных печах на 100 °С. Экономия топлива при этом составит 12 % или 5–10 кг условного топлива на тонну проката.

За счет увеличения массы сляба и увеличения длины раската (вследствие увеличения ширины холодильника после реконструкции) количество отходов уменьшилось на 104,4 тыс. т/год.

Реализация проектных решений позволила снизить средний расходный коэффициент прокатки слябов на лист с 1,237 до 1,15.

Производство листа методом контролируемой прокатки позволяет обеспечить высокие механические характеристики, улучшить плоскостность листа, уменьшить массу изделия из листа, а также обеспечить более длительный срок эксплуатации нефте- и газопроводов в экстремальных климатических условиях.

Реализация охлаждения раскатов в установке контролируемого охлаждения (УКО) за счет получения высоких механических свойств обеспечивает уменьшение издержек производства на термическую обработку листов в печах.

Наибольшее распространение в настоящее время получило в качестве энергосберегающего мероприятия внедрение преобразователей частоты, используемых для эффективного и экономичного управления электроприводами переменного тока.

Внедрение преобразователей частоты на стане 3000 позволило:

- экономить 10–12 % потребляемой электроэнергии;
- увеличить число включений и отключений для мощных электроприводов за счет снижения пусковых токов;
- повысить надежность работы технологического оборудования за счет снижения динамических перегрузок и снизить затраты на его ремонт;
- включить электроприводы в систему автоматизированного управления технологическим процессом;
- уменьшить воздействие электроприводов на питающую сеть.

Наиболее перспективными областями применения регулируемых электроприводов переменного тока в прокатном производстве являются системы охлаждения крупных электрических машин, рольгангов, вентиляторов, насосов и пр.

Для смазки подшипников качения рольгангов предусматривается современная экономически эффективная и экологически чистая система минимального дозирования типа «масло-воздух». В процессе эксплуатации данной системы достигаются следующие результаты:

- в 1,5 раза увеличивается срок службы подшипников;
- экономия смазочных материалов (в 15–20 раз меньше, чем при использовании пластичных смазок);
- отсутствие затрат на удаление отработанных смазок;
- снижение затрат на ремонт и техническое обслуживание.

Примером внедрения АСУ может служить автоматизация нагрева слябов в четырех проходных методических печах толстолистного стана 3000. Применение АСУ для контроля нагрева слябов позволяет уменьшить расход топлива на 18 %.

При реконструкции сортопрокатного цеха на ОАО «Днепропетровский металлургический комбинат им. Ф.Э. Дзержинского» для снижения потерь тепловой энергии и, как следствие, уменьшения количества дополнительно вводимой энергии в ходе технологического процесса будут применены следующие энергосберегающие технологии:

- использование тепла прокатного нагрева для проведения термообработки проката в потоке стана;
- применение современных огнеупорных материалов при сооружении нагревательных печей;
- с целью экономии природного газа предусматривается отопление печи смесью доменного и природного газов; в среднем экономия природного газа при отоплении смесью газов может достигать 2200 м<sup>3</sup>/час.

Также проектом предусмотрено место для установки энерго- и ресурсосберегающей системы «бесконечной» прокатки со сваркой заготовки.

Применение «бесконечной» прокатки со сваркой заготовки позволяет [4]:

- уменьшить удельный расход энергии на 2–7 %;
- увеличить срок службы ручья валка на 3–4 %;

- увеличить срок службы проволок на 4 %;
- увеличить производительность на 10–15 %;
- увеличить выход годного на 2,0–3,0 %;
- значительно улучшить качество проката как по геометрии (отсутствие деформированных передних и задних концов раската), так и по механическим свойствам за счет равномерности температурного режима.

Сочетание повышения производительности с сокращением затрат благодаря понижению удельных расходов дает в результате значительную экономию общих затрат – 3,4–4,3 долл. США на тонну [5].

Аналогичная система предусматривается на прокатных станах сталепрокатного завода в г. Белая Церковь.

При строительстве стана холодной прокатки с травильным отделением и линией непрерывного горячего оцинкования на ОАО «Модуль» (г. Каменец-Подольский) для обеспечения энергосбережения рабочим проектом предусмотрены следующие мероприятия:

- применена малоотходная схема регенерации отработанных травильных растворов;
- приняты меры по сокращению непроизводительных потерь энергоресурсов за счет автоматического контроля основных процессов перекачки сред;
- трубопроводы с кристаллизующимися растворами, связывающие травильное отделение стана со складом растворов, проложены в подземном канале совместно с паропроводом потребителей основного производства, что позволило на 90 % сократить расход пара на обогрев каналов промпроводок;
- установка регенерации отработанных травильных растворов имеет в своем составе рекуператор и абсорбер, позволяющие максимально использовать на технологические нужды тепло, уносимое из реактора дымовыми газами;
- применена система вытяжной аварийной вентиляции, работающей только при превышении ПДК вредных веществ, контролируемых газоанализаторами.

Кроме того, использование непрерывного травильного агрегата для удаления окалина позволяет максимально автоматизировать процесс и максимально снизить расход кислоты. Травление осуществляется в растворе соляной кислоты, что уменьшает потери металла при травлении на 25 %; снижает стоимость травления и значительно уменьшает расход кислоты по сравнению с травлением в серной кислоте.

В зоне предварительного нагрева печи для отжига установлены двухпроводные горелки, оборудованные современной автоматикой и системой управления, что обеспечивает максимальное химическое сжигание газа. В отходящих продуктах сгорания содержание CO не более 0,04 % и NO<sub>x</sub> не более 100 мг/м<sup>3</sup>, что не превышает допустимые нормы.

Из предварительной зоны отводится около 9000 м<sup>3</sup>/час продуктов сгорания с температурой примерно 1000 °С. Это тепло утилизируется (подогрев воды), что даст годовую экономию около 2800 т у.т.

В зоне радиантных труб продукты сгорания проходят через рекуператоры, где подогревают воздух для горения до 200–250 °С, что дает экономию топлива на 10–12 %. Расход природного газа на зону составляет до 200 м<sup>3</sup>/час.

Для снижения материалоёмкости и стоимости строительства фундаменты в отделении травления приняты не массивные, а облегчённые, в виде рамных конструкций, обеспечивающих необходимую пространственную жёсткость.

Сооружение в третьей очереди отделения регенерации отработанных травильных растворов позволит снизить количество завозимой со стороны соляной кислоты с 8460 м<sup>3</sup>/год до 860 м<sup>3</sup>/год. Одновременно, в процессе регенерации кислоты, получается до 5000 т/год ценного продукта – оксида железа (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), который широко используется в лакокрасочной, электротехнической, химической и других отраслях промышленности.

Предложенные технические решения для реконструируемых и новых прокатных цехов по энергосбережению и снижению материальных затрат обеспечивают существенное снижение удельных расходов электроэнергии и природного газа, увеличивают выход годного товарного проката, что существенно снизит себестоимость товарной продукции и обеспечит конкурентоспособность на мировом рынке и внутри страны.

**Список литературы:** 1. Сталинский Д.В. Решение проблем экологии и ресурсосбережения в проектах «Гипростали» / Д.В. Сталинский, А.А. Каверинский, А.А. Павленко // Экология и промышленность.– 2005.– № 2(3).– С. 7-11. 2. Арих В.С. Использование современных технологий при строительстве новых и реконструкции существующих прокатных цехов, направленных на энерго- и ресурсосбережение / В.С. Арих, В.Ю. Кулак // Экология, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей среды и здоровье человека, утилизация отходов: сборник научных статей XV Международной научно-практической конференции, 4-8 июня 2007 г., г. Щелкино, АР Крым: в 2 т. Т. 1. / УкрГНТЦ «Энергосталь».– Харьков: «Издательство САГА», 2007.– 418 с. 3. Арих В.С. Реконструкция стана 2800 на ОАО «Алчевский металлургический комбинат» / В.С. Арих, Е.И. Новиков // Металлургическая и горнорудная промышленность.– 2008.– № 1.– С. 15-17. 4. Аустен Т.Х. «Бесконечная прокатка на сортовых станах» // Черные металлы.– 2003.– июнь.– С. 74-80. 5. EWR «Непрерывная прокатка со сваркой» и «линии наматывания» – результат внедрения новаторского оборудования на установках, работающих с эффективным сбережением затрат // Дни технологии Danieli.– Донецк, Украина.– 15-16 июля 2005.– С. 44-55.

**НИКОЛАЕВ В.А.**, докт.техн.наук, проф., ЗГИА, г. Запорожье

**ВАСИЛЬЕВ А.Г.**, ст.преподаватель, ЗГИА, г. Запорожье

**ВАСИЛЬЕВ А.А.**, аспирант, ЗГИА, г. Запорожье

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ-ВОЛОЧЕНИЯ ТОНКИХ ПОЛОС**

Приведены методика и результаты исследований процесса прокатки-волочения (ПВ) при деформации тонких полос в холостых валках в сравнении с процессом прокатки в приводных валках (ПРВ). Выполнен сравнительный анализ энергосиловых параметров процессов ПВ и ПРВ при прокатке тонких полос. Показана возможность и целесообразность использования процесса ПВ при деформации полос с небольшими обжатиями.

Ключевые слова: прокатка, прокатка-волочение, полоса, приводные валки, холостые валки, шероховатость поверхности, опережение, обжатие.

Наведені методика і результати досліджень процесу прокатки – волочіння (ПВ) при деформуванні тонких штаб у холостих валках у порівнянні з процесом прокатки в приводних валках (ПРВ). Виконано порівняльний аналіз енергосилових параметрів процесів ПВ і ПРВ під час прокатки тонких штаб. Показано можливість і доцільність використання процесу ПВ при деформуванні штаб з невеликими обтисками.

Ключові слова: прокатка, прокатка – волочіння, штаба, приводні валки, холості валки, шорсткість поверхні, випередження, обтиск.

The methods and results of rolling-drawing process researches (RD) in thin strips deformation in free rolls are proposed in this article. There results are given in comparison with rolling process in driven rolls (DR). the comparative analysis of power parameters of rolling drawing (RD) process and driven rolls (DR) process in thin strips rolling. The possibility and expedience of RD process usage in strips deformation with small reduction.

Key words: rolling, rolling – drawing, strip, driven rolls, free rolls, surface roughness, an advance forward creep, reduction.

*Введение.* В настоящее время актуальным является снижение энергосиловых параметров и повышение качества при прокатке полосовой стали. В частности при холодной прокатке полос. Улучшение указанных показателей может быть обеспечено снижением влияния контактных напряжений трения в очаге деформации.

*Состояние вопроса.* Одним из способов уменьшения влияния контактных касательных напряжений на непрерывных и реверсивных станах является применение процесса прокатки тонких полос в неприводных валках (процесс прокатка-волочение) [1-3].

Процесс холодной прокатки в неприводных рабочих валках небольшого диаметра в четырехвалковых или многовалковых клетях используют для получения тонких полос [4, 5]. В данном процессе рабочие валки не имеют электропривода, но получают энергию для деформации и транспортировки полос от опорных валков за счет контактного межвалкового взаимодействия. В связи с этим рабочие валки в этом про-

цессе можно лишь условно называть неприводными и поэтому характер течения металла по длине очага деформации подобен прокатке в приводных валках [4].

В некотором смысле неприводными являются валки (ролики) при деформации полосы волочением. В этом процессе валки (ролики) вращаются (получают энергию вращения) через полосу от натяжного устройства, а условия деформации полосы существенно отличаются от закономерностей течения металла при прокатке. Так, по данным [1] в процессе волочения в неприводных валках (роликах) (процесс прокатки - волочение) влияние контактных касательных напряжений существенно уменьшается, а коэффициент трения рекомендуют определять по выражению

$$f_{\text{ПВ}} = f_{\text{В}} \frac{\mu - 1}{2(\mu + 1)} = f_{\text{В}} \cdot k_{\text{ПВ}}, \quad (1)$$

где  $f_{\text{ПВ}}$  – приведенный коэффициент трения при прокатке – волочении;  $f_{\text{В}}$  – коэффициент трения при волочении в монолитной волоке;  $\mu$  – коэффициент вытяжки металла;  $k_{\text{ПВ}}$  – коэффициент уменьшения коэффициента трения  $f_{\text{В}}$ .

Как следует из выражения (1), коэффициент трения  $f_{\text{ПВ}}$  при  $\mu > 1$  всегда меньше величины  $f_{\text{В}}$ , что обуславливает снижение усилия деформации. В работе [2] отмечается, что приведенный коэффициент трения  $f_{\text{ПВ}}$ , представляющий собой отношение усилия волочения, затраченного на преодоление суммы контактных касательных напряжений в очаге деформации к нормальному усилию металла на валки (ролики), примерно на порядок меньше, чем при волочении в монолитной волоке. При прокатке – волочении, как и в процессе прокатки в приводных валках, в очаге деформации существуют зоны отставания и опережения [3, 6]. Угол критического сечения при волочении в неприводных роликах (валках) может быть определен из выражения [3]

$$\gamma = 0,5\alpha(1 + \rho / f_{\text{ПВ}}R); \quad (2)$$

$$\rho = f_{\text{Ш}} \cdot r_{\text{Ш}}, \quad (3)$$

а величину опережения  $S$  и скорость  $v_{\text{В}}$  вращения валков (роликов) определяют из выражений:

$$S = v_{\text{П}}/v_{\text{В}} - 1; \quad v_{\text{В}} = v_{\text{П}}/(1+S), \quad (4)$$

где  $\gamma$  – угол критического сечения;  $\alpha$  – угол контакта;  $R$  – радиус валков;  $\rho$  – радиус трения в шейках валков;  $r_{\text{Ш}}$  – радиус шейки;  $f_{\text{Ш}}$  – коэффициент трения в шейках;  $v_{\text{П}}$  – скорость движения полосы при протягивании.

При  $\rho \rightarrow 0$  отношение  $\gamma/\alpha$  не превышает величины 0,5 ( $\gamma/\alpha < 0,5$ ), что подтверждается экспериментальными исследованиями при прокатке в клети с одним неприводным (холостым) валком [7, 8]. В условиях несимметричной прокатки на холостом валке при  $\varepsilon > 0,2$  коэффициент трения в 1,75 раза, а усилие прокатки в 1,07 – 1,10 раза меньше, чем при симметричной прокатке в приводных валках, а отношение  $\gamma/\alpha \rightarrow 0,5$  и существенно больше, чем на приводном валке. В исследованиях [6] при прокатке полос с размерами в сечении 25×25мм перераспределение части обжатия с приводной клети (ПК) на неприводную клеть (НК) (при  $\mu = \text{const}$ ) в определенных условиях позволяет, за счет снижения влияния сил трения и напряжения течения металла, уменьшить мощность деформации в 1,3 – 1,55 раза по сравнению с прокаткой в одной клети типа ПК.

*Задачи исследований.* В связи с дальнейшим развитием теории и практики протягивания (волочения) в неприводных валках в работе решается задача получения оценки процесса прокатки-волочения (ПВ) при деформации тонких полос в сравнении с классическим процессом прокатки в приводных валках (ПРВ).

*Основная часть исследований.* Исследования выполняли в клети дуо с диаметром валков  $D \approx 51,8 \text{ мм}$ , при их окружной скорости  $v_B \approx 0,05 \text{ м/с}$ , шероховатость валков  $Ra$ , мкм: верх – 0,45; низ – 0,97. Прокатывали отожженные полосы алюминия марки АКЛП-ПТ-5Е толщиной  $H = 1,07 \text{ мм}$  и шириной  $B \approx 23,5 \text{ мм}$  с обжатием  $\varepsilon = 0,05 - 0,48$ . В приводных валках прокатывали первую часть каждой полосы длиной  $L \approx 500 \text{ мм}$ . После прокатной серии, клеть без привода переносили на горизонтальную волочильную установку [9] и при помощи приводного барабана протягивали вторую часть полосы со скоростью  $v_{П} = 0,05 \text{ м/с}$  в холостых валках. Такой способ прокатки обеспечивает одинаковые механические свойства полос в обоих процессах. Измеряли толщину до и после прокатки с точностью  $0,01 \text{ мм}$ , определяли ширину полосы с точностью  $0,05 \text{ мм}$  и опережение по керновым отметкам на верхнем ( $L_B$ ) и нижнем ( $L_H$ ) валках ( $L_B = 100,0 \text{ мм}$ ;  $L_H = 99,0 \text{ мм}$ ) и коэффициент вытяжки ( $\mu$ ) по керновым отметкам на полосе до и после прокатки. В стандартных условиях на прессе УГП-20/2 определяли усилия напряжения течения  $\sigma_T$  и предел прочности  $\sigma_B$  металла в зависимости от величины относительного обжатия (рис.1).

Усилие на валки определяли тензометрическими месдозами, а усилие протягивания (волочения) полосы в холостых валках измеряли переносным динамометром. Все измерительные устройства тарировали до и после процесса деформирования.

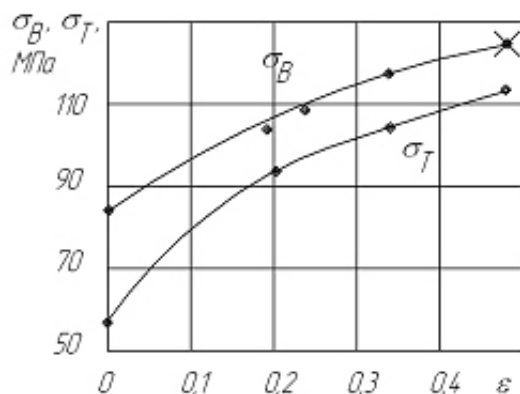


Рис.1. Предел прочности ( $\sigma_B$ ) и напряжение течения ( $\sigma_T$ ) алюминия марки А5Е с химсоставом, %: 0,09-0,1 Si; 0,21-0,35 Fe; Ti, Mn, Mg, Cu, Ni, Zn, Cr, Pb, Zr, Na, V в пределах 0,00005-0,001, остальное алюминий (х – обрыв полосы)

Коэффициент трения при прокатке (ПРВ) рассчитывали по формуле Экелунда – Павлова (Ю. Файнберга) ( $l_d / h_{cp} > 3$ ):

$$f = \frac{0,5 \cdot \alpha}{1 - 2\gamma/\alpha}; \quad (5)$$

$$\gamma = \sqrt{s \cdot h / R \cdot 100}, \quad (6)$$

где  $s$  – величина опережения;  $h$  – толщина полосы после прокатки;  $R$  – радиус валков.

При волочении в холостых валках (ПВ) коэффициент  $f_{ПВ}$  рассчитывали без учета влияния сил трения в подшипниках качения при  $f_{ш} = 0,003$  по формуле

$$f_{ПВ} = T_{ПВ} / 2P, \quad (7)$$

где  $T_{ПВ}$  – усилие прокатки-волочения;  $P$  – усилие, действующее на валки.

Экспериментальные и расчетные данные исследований представлены в табл.1 и на рис.1-3. Из рис.2,а следует, что величины опережений при прокатке и прокатке – волочении в неприводных валках существенно различаются.

В условиях прокатки в приводных валках (кривые 1,2) величины опережений при максимальных обжатиях  $\varepsilon \approx 0,47$  находятся в пределах  $S=4,2-4,4\%$ .

Большие значения, для практически одинаковых диаметров валков, соответствуют валку с большей шероховатостью поверхности, что согласуется с данными [8].

Для условий прокатки в приводных валках (ПРВ) с  $\varepsilon \geq 0,2$  отношение  $\gamma/\alpha$  изменяется от  $\gamma/\alpha=0,383$  до  $\gamma/\alpha=0,248$ . При прокатке- волочении полосы в холостых валках (ПВ) для  $\varepsilon < 0,1$  величины опережений на шероховатых валках (кривые 2, 4) практически совпадают, а на гладких валках (кривые 1, 3) существенно отличаются. При  $\varepsilon > 0,15$  величины опережений при прокатке-волочении полос значительно выше, чем при прокатке и для  $\varepsilon \geq 0,4$  составляют  $S=24,2-29,5\%$  (кривые 3, 4).

Таблица 1

| h, мм                                | ε, %  | b, мм | P, кН | p <sub>ср</sub> , МПа | T <sub>ПВ</sub> , кН | σ <sub>н</sub> , МПа | S, % |      | f     | f <sub>ПВ</sub> |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-----------------------|----------------------|----------------------|------|------|-------|-----------------|
|                                      |       |       |       |                       |                      |                      | верх | низ  |       |                 |
| Прокатка в приводных валках          |       |       |       |                       |                      |                      |      |      |       |                 |
| 1,02                                 | 4,67  | 23,50 | 2,03  | 74,6                  | -                    | -                    | 1,1  | 2,2  | -     | -               |
| 0,98                                 | 8,41  | 23,55 | 2,83  | 77,3                  | -                    | -                    | 2,2  | 2,2  | -     | -               |
| 0,93                                 | 13,08 | 23,60 | 4,29  | 93,8                  | -                    | -                    | 2,6  | 2,9  | -     | -               |
| 0,87                                 | 18,69 | 23,55 | 6,71  | 123,1                 | -                    | -                    | 2,7  | 2,7  | -     | -               |
| 0,80                                 | 25,23 | 23,50 | 7,65  | 121,8                 | -                    | -                    | 3,0  | 3,4  | -     | -               |
| 0,75                                 | 29,91 | 23,45 | 9,53  | 140,0                 | -                    | -                    | 4,0  | 4,3  | 0,148 | -               |
| 0,70                                 | 34,58 | 23,60 | 10,93 | 148,7                 | -                    | -                    | 3,7  | 4,1  | 0,131 | -               |
| 0,65                                 | 39,25 | 23,65 | 11,40 | 145,5                 | -                    | -                    | 3,8  | 4,3  | 0,128 | -               |
| 0,62                                 | 42,06 | 23,60 | 12,26 | 151,5                 | -                    | -                    | 4,1  | 4,3  | 0,127 | -               |
| 0,56                                 | 47,66 | 23,75 | 13,20 | 152,6                 | -                    | -                    | 4,2  | 4,4  | 0,124 | -               |
| Волочение полос в неприводных валках |       |       |       |                       |                      |                      |      |      |       |                 |
| 0,99                                 | 7,48  | 23,40 | 1,79  | 54,2                  | 0,250                | 10,6                 | 3,9  | 3,6  | -     | 0,076           |
| 0,94                                 | 12,15 | 23,30 | 2,50  | 67,3                  | 0,400                | 17,9                 | 5,5  | 3,8  | -     | 0,080           |
| 0,90                                 | 15,89 | 23,30 | 3,75  | 78,3                  | 0,575                | 26,9                 | 6,4  | 4,2  | -     | 0,075           |
| 0,85                                 | 20,56 | 23,30 | 4,92  | 85,1                  | 0,755                | 37,4                 | 9,5  | 7,5  | -     | 0,077           |
| 0,79                                 | 26,17 | 23,35 | 5,70  | 91,7                  | 0,975                | 51,9                 | 15,4 | 8,9  | -     | 0,085           |
| 0,71                                 | 33,64 | 23,35 | 6,56  | 92,7                  | 1,250                | 74,0                 | 22,5 | 14,2 | -     | 0,094           |
| 0,67 <sup>1)</sup>                   | 37,38 | 23,40 | 6,87  | 93,3                  | 1,300                | 81,3                 | 24,3 | 17,7 | -     | 0,095           |
| 0,62 <sup>2)</sup>                   | 42,06 | 23,40 | 7,09  | 92,3                  | 1,480                | 100,1                | 29,5 | 24,2 | -     | 0,104           |
| 0,565 <sup>3)</sup>                  | 47,20 | 22,35 | 7,34  | 87,8                  | 1,575                | 122,4                | -    | -    | -     | 0,107           |

Результаты экспериментов по прокатке и прокатке- волочению полос из алюминия  
Примечание: 1) – появление линий течения Людерса; 2) – обрыв полосы в конце протягивания; 3) – обрыв полосы в начале протягивания.

Во всех случаях опережение со стороны гладкого валка (с меньшей шероховатостью) несколько больше, чем со стороны шероховатого, что свидетельствует о меньшей его скорости вращения [см. выражение (4)] вследствие больших величин микропроскальзываний на контакте полосы с валком. Для данного очага деформации ше-

роховатый валок (0,97мкм  $Ra$ ) является “приводным” для гладкого валка (0,45мкм  $Ra$ )[7,8].

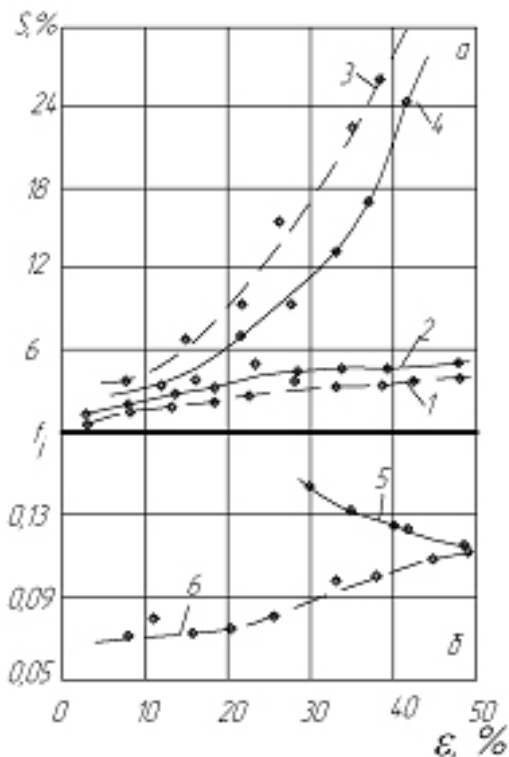


Рис.2. Изменение опережения (а) и коэффициента трения (б) в зависимости от относительного обжатия при прокатке (1, 2, 5) и прокатке-волочении (3, 4, 6) со стороны гладкого (1, 3) (верх) и шероховатого (2, 4) (низ) валков: ( $D_B \approx 51,9$ мм,  $D_H \approx 51,8$ мм,  $H=1,07$ мм; шероховатость валков  $Ra$ , мкм: верх – 0,45; низ – 0,97; смазка – масло индустриальное ИС-20)

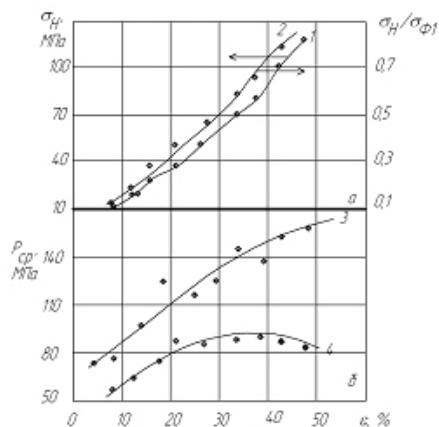


Рис.3. Изменение напряжения натяжения  $\sigma_H$  (1) и коэффициента  $\sigma_H/\sigma_{\Phi 1}$  (2) (а) и среднего нормального контактного напряжения  $p_{cp}$  (3, 4) (б) в зависимости от относительного обжатия: 3 – прокатка; 1, 2, 4 – прокатка-волочение в неприводных валках ( $D \approx 51,82$ мм,  $H=1,07$ мм; шероховатость валков  $Ra$ , мкм: верх – 0,45; низ – 0,97; смазка – масло индустриальное ИС-20)

Напряжение натяжения  $\sigma_H$  рассчитывали по выражению  $\sigma_H = T_{\text{лб}} / h \cdot b$ ,

где  $h$  и  $b$  – толщина и ширина полосы после деформации соответственно.

Напряжение протягивания при прокатке-волочении полосы в неприводных валках (ПВ) (кривые 1, 2) обусловлено сопротивлением течению металла в очаге деформации. Чем больше величина обжатия, тем больше значения  $\sigma_H$  и  $\sigma_H/\sigma_{\Phi 1}$ . При обжатиях  $\varepsilon < 0,15$  сопротивление течению металла в холостых валках несколько меньше, чем при прокатке в приводных валках и при этом нормальные контактные напряже-

Расчеты по выражениям (5) – (7) показали, что величины, коэффициентов трения отличаются (рис.2,б). При прокатке в приводных валках (точки 5) коэффициент трения  $f$  несколько снижается, а при прокатке-волочении (точки 6) коэффициент трения  $f$  увеличивается с увеличением относительного обжатия вследствие уменьшения толщины слоя смазки. Это согласуется с известными данными [8].

На рис.3 представлены зависимости, отражающие влияние относительного обжатия на характер изменения нормального контактного напряжения  $p_{cp}$  в процессах прокатки в приводных валках и прокатки-волочения в неприводных валках.

ния  $p_{cp}$  при прокатке-волочении существенно меньше – на 21-32% (кривые 3, 4). Очевидно, в тех условиях деформации полос, когда относительное обжатие не превышает  $\varepsilon=0,1 - 0,15$  целесообразно вместо процесса прокатки (дрессировка) применять процесс волочения в валках с отключенным приводом (то есть в холостых валках). При прокатке-волочении с обжатием  $\varepsilon=0,3 - 0,4$  среднее нормальное контактное напряжение  $p_{cp}$  на 32-36% ниже, чем при прокатке. Однако при прокатке-волочении с  $\varepsilon=37,38\%$  на готовой полосе в процессе протягивания образуются линии течения (линии Людерса), а при обжатиях  $\varepsilon \geq 42,06$  происходит обрыв полосы после выхода ее из валков. В этих условиях отношение  $\sigma_H/\sigma_{Ф1} \geq 0,8$  (кривая 2).

Из рис.1 и 3, б следует, что при прокатке в приводных валках среднее нормальное контактное напряжение  $p_{cp}$  (рис.3, б) во всем диапазоне обжатий превышает величины напряжения течения металла  $\sigma_T$  (рис.1), особенно при  $\varepsilon > 0,3$ . Это свидетельствует о существовании в очаге деформации объемного напряженного состояния. При прокатке-волочении в неприводных валках значения среднего нормального контактного напряжения  $p_{cp}$  во всем диапазоне обжатий меньше напряжения течения  $\sigma_T$  на выходе из валков и меньше среднего нормального контактного напряжения при прокатке (см. рис.1 и рис.3, б). Это обусловлено преобладающим влиянием в очаге деформации напряжений продольного растяжения, которые нивелируют действие продольных подпирющих напряжений  $\sigma_3$  от контактных касательных напряжений.

**Выводы.** Выполнены исследования изменения опережения и средних нормальных контактных напряжений при прокатке полос в приводных валках и в процессе прокатки – волочения полос в холостых валках. Установлено, что при прокатке – волочении величины опережений существенно больше (до  $S=24,2-29,5\%$  при  $\varepsilon \approx 0,4$ ), чем в приводных валках ( $S=4,1-4,4\%$  при  $\varepsilon \approx 0,42-0,47$ ). В приводимых экспериментах процесс ПВ осуществляется устойчиво при обжатиях  $\varepsilon \leq 0,3$  и обеспечивается получение полосы с качественной поверхностью. При обжатии  $\varepsilon \geq 0,37$  появляются линии течения Людерса и происходит разрыв полос после валков вследствие больших растягивающих напряжений.

В реальных условиях осуществление процесса ПВ при  $\varepsilon \leq 0,3$  по сравнению с прокаткой в приводных валках (ПРВ) обеспечивает снижение нормальных контактных напряжений в пределах 30-34%. Процесс ПВ может быть использован при деформации полос с небольшими обжатиями.

**Список литературы:** 1. Теория волочения./Перлин И.Л., Ерманок М.З. -М.: Металлургия, 1971.-448с. 2. Анализ влияния коэффициента внешнего трения на параметры процесса волочения в роликовых волоках / Добров И.В. // Наукові вісті. Сучасні проблеми металургії. МОНУ, НМАУ.- Дніпропетровськ, 2005, №8.-С.131-135. 3. Добров И.В., Сравнительный анализ процессов прокатки и волочения в роликовых волоках / Добров И.В., Грудев А.П., Коковихин Ю.В // Изв. вузов. Черная металлургия, 1987, №10.-С.44-48. 4. Прокатка на многовалковых станах / П.И. Полухин, В.П. Полухин, А.Ф. Пименов и др. – М.: Металлургия, 1981.-248с. 5. Станы холодной прокатки (теория, оборудование, технология)/ Гарбер. Э.А. – М.: ОАО “Черметинформация”; Череповец: ГОУ ВПО ЧГУ, 2004.-416с. 6. Непрерывная прокатка сортовой стали / А.П. Лохоматов, С.М. Жучков, Л.В. Кулаков и др.-К.: Наукова думка, 1998.-239с. 7. Определение кинематических и энергосиловых параметров прокатки при одновалковом приводе /Николаев В.А.// Изв. вузов. Черная металлургия, 1993, №1.-С.34-37. 8. Теория и практика процессов прокатки /Николаев В.А.-Запорожье, ЗГИА, 2002.-232с. 9. Оценка методов определения коэффициента трения при волочении /Николаев В.А., Васильев А.Г. // Изв. вуз. Черная металлургия, - 1991, №7.-С.48-50. 10. Николаев В.А. Несимметричная тонколистовая прокатка / Николаев В.А., Скороходов В.Н, Полухин В.П.-М.: Металлургия, 1993.-192с.

*ЖУЧКОВ С. М.*, докт. техн. наук, проф., ИЧМ НАНУ, г. Днепропетровск

*БАРЫШЕВ Е. В.*, ЭПП ИЧМ НАНУ, г. Днепропетровск

*ЛОХМАТОВ А. П.*, канд. техн. наук, ИЧМ НАНУ, г. Днепропетровск

*СИКАЧИНА И. В.*, ИЧМ НАНУ, г. Днепропетровск

*КЛЮЧНИКОВ К. Ю.*, ИЧМ НАНУ, г. Днепропетровск

*ГАЛЕНКО Ю. С.*, ИЧМ НАНУ, г. Днепропетровск

*БАРЫШЕВА Л. П.*, ИЧМ НАНУ, г. Днепропетровск

## **ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ МЕТАЛЛА К ХОЛОДНОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ПРОФИЛИ ПРОСТЫХ И СЛОЖНЫХ СЕЧЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕСПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПРОИЗВОДСТВ.**

Освоена технология газовоздушного патентирования на созданном экспериментальном технологическом участке подготовки металла к холодной деформации, обеспечивающая получение микроструктуры и механических свойств проволоочной заготовки, аналогичных микроструктуре и механическим свойствам той же заготовки после традиционного патентирования в расплаве соли или свинца. Идентичность микроструктуры и свойств проволоочной заготовки после газовоздушного и традиционного патентирования приводит к одинаковому характеру изменения свойств в процессе холодной пластической деформации.

Ключевые слова: участок подготовки металла, газо-воздушное патентирование, холодная деформация, профили простых и сложных сечений.

Освоена технологія газоповітряного патентування на створеній експериментальній технологічній ділянці підготовки металу до холодної деформації, що забезпечує одержання микроструктури й механічних властивостей дротової заготовки, аналогічних микроструктурі й механічним властивостям тієї ж заготовки після традиційного патентування в розплаві солі або свинцю. Ідентичність микроструктури й властивостей дротової заготовки після газоповітряного й традиційного патентування приводить до однакового характеру зміни властивостей у процесі холодної пластичної деформації.

Ключові слова: ділянка підготовки металу, газо-повітряне патентування, холодна деформація, профілі простих і складних перерізів.

The technology of gas-air patenting on the created experimental technological site of preparation of metal to cold deformation ensuring reception of microstructure and mechanical properties of wire preparation, similar to microstructure and mechanical properties of the same preparation after traditional patenting in solution of salt or Pb is fulfilled. The identity of microstructure and properties of wire preparation after gas-air and traditional patenting results in identical character of change of properties during cold plastic deformation.

Key words: a site of preparation of metal, gas-air patenting, cold deformation, structures of simple and complex sections.

Высокая капиталоемкость и большие единичные мощности традиционных метизных производств делают экономически нецелесообразным освоение новой продукции при ее широком ассортименте, но относительно малых объемах потребления. К такому виду продукции относятся, в частности, особоточные профили простых и сложных сечений, потребность в которых украинского машиностроения в настоящее время покрывается в основном за счет импорта [1-5].

Критерием пригодности металла к холодной деформации является его структура, механические свойства и состояние поверхности заготовки (катанки, проволоки или промежуточного профиля). На метизных заводах эти задачи решаются путем термообработки заготовки с последующим удалением окалины травлением в кисло-

тах. Нагрев заготовки, в основном, осуществляется в проходных печах непрерывного действия с использованием природного газа. При выходе из печи нагретую заготовку подвергают охлаждению в печах-ваннах с охлаждающей средой в виде расплавленной селитры или свинца, где происходит переохлаждение аустенита и его распад. Для очистки поверхности заготовки от окалина традиционно используют химические методы – травление кислотами с сопутствующими процессами нейтрализации, промывки систем регенерации и очистки сточных вод.

Из сказанного следует, что традиционные процессы термической обработки заготовки и очистки ее поверхности перед холодной деформацией связаны с использованием дорогих и дефицитных материалов, и, в тоже время, вредных для здоровья человека и значительно загрязняющих окружающую среду, что делает их абсолютно непригодными для использования в условиях неспециализированных производств и, особенно, при небольших объемах изготовления особоточных профилей.

Экспериментальный технологический участок подготовки заготовки к прокатке-волочению предназначен для отработки технологии подготовки металла к холодной деформации в профили простых и сложных сечений, с использованием нетрадиционных технических и технологических решений.

Показатели назначения технологического участка следующие:

1. Обрабатываемые заготовки:

- катанка диаметром 8,0...5,5 мм в мотках наружным внутренним диаметром 1250/850 мм, массой до 1800 кг;

- проволока диаметром 5,0...2,5 мм (профили-полуфабрикаты эквивалентного сечения) в мотках наружным и внутренним диаметром 900/450 мм, массой до 600 кг.

2. Марки стали: высокоуглеродистые нелегированные стали по ГОСТ 14959, стали углеродистые качественные конструкционные по ГОСТ 1050, стали легированные конструкционные по ГОСТ 4543.

3. Технологические параметры процесса обработки:

- скорость перемещения обрабатываемого металла, м/мин - 9...18

- температура нагрева, °С - 950...1050

- температура термостатирования, °С - 600...450

- температура окончательного охлаждения, °С - не более 100

- количество окалина после роликового окалиноломателя - не более 0,5 кг/т.

Участок подготовки металла к холодной деформации профилей в условиях неспециализированного производства оборудован в отделении стендовых установок Отдела физико-технических проблем прокатки сортового и специального проката Института черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины (ИЧМ) в соответствии с проектом ГП «Украинский Государственный Институт по проектированию металлургических заводов» (ГП «Укрگیпромет») [6]. Создание этого участка основано на использовании нетрадиционных решений и подходов к разработке технологических схем производства холоднодеформированного проката, разработанных в ИЧМ при выполнении ряда фундаментальных исследований [7-10].

Участок подготовки металла к холодной деформации включает комплекс взаимосвязанных агрегатов, установленных в единой технологической линии (рис. 1), и состоит из установленных по ходу технологического процесса размоточного устройства (1), средства нагрева металла, выполненного в виде электроконтактного нагревателя (2) вместо газовых или электрических муфелей сопротивления, блока газоздушного охлаждения (3) и блока термостатирования металла (4), примыкающего к

блоку газоздушного охлаждения, вместо традиционных ванн с расплавами свинца или солей, устройства водовоздушного охлаждения (5) вместо охлаждающей ванны с водой, устройства механического удаления окалины (6) вместо комплекса кислотного травления, устройства для нанесения подмазочного слоя на поверхность металла (7) и намоточного устройства (8).

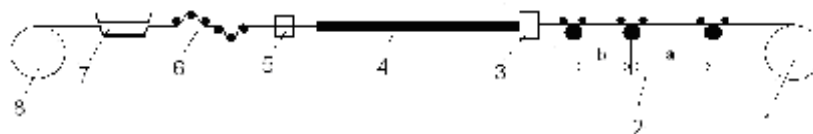


Рис. 1 Схема размещения агрегатов экспериментального участка подготовки металла к холодной деформации (обозначения в тексте)

Рабочие органы комплекса указанных агрегатов, установленных в единой технологической линии, образуют технологическую ось процесса.

Работа на участке осуществляется следующим образом.

Моток заготовки (проволоки или катанки) диаметром 2,5...8,0 мм из высокоуглеродистой стали, предназначенной для последующей холодной деформации при производстве высокоточных профилей, используемые в машиностроении, устанавливают на размоточное устройство. Передний конец заготовки последовательно направляют в рабочие органы всех перечисленных выше агрегатов, составляющих технологическую линию. Перемещение заготовки вдоль технологической оси процесса обеспечивается посредством намоточного устройства.

Нагревают заготовку до температуры 950 – 1050<sup>0</sup>С с помощью электроконтактного нагревателя, собранного по двухплечевой схеме. При нагреве до указанных температур образуется структура аустенита. После этого нагретая заготовка перемещается в блок газоздушного охлаждения, где она охлаждается посредством высокоскоростных воздушных потоков. Режим газоздушного охлаждения (скорость охлаждения, температура поверхности металла и пр.) устанавливают, исходя из требований к готовой холоднодеформированной продукции по структуре, комплексу механических свойств и служебных характеристик, определяемых ее назначением.

Затем охлажденная в блоке газоздушного охлаждения (на первой стадии охлаждения) высокоскоростными воздушными потоками до температуры 450 – 600<sup>0</sup>С, заготовка поступает в блок термостатирования металла. В блоке термостатирования в зависимости от назначенного режима обработки, определяемого маркой стали обрабатываемой заготовки и ее назначением, осуществляют изотермическую выдержку металла, его замедленное охлаждение или подогрев. Окончательное охлаждение заготовки осуществляют в устройстве водовоздушного охлаждения, установленном после блока термостатирования. В зависимости от диаметра обрабатываемой заготовки, марки стали и ее назначения используют цилиндрические рабочие камеры с разными внутренними диаметрами и длиной.

Охлажденная заготовка поступает в устройство механического удаления окалины знакопеременным изгибом. Амплитуда знакопеременного изгиба заготовки может изменяться в пределах 50 – 500 мм. Изменение амплитуды необходимо для надежного бездефектного удаления окалины с поверхности заготовки диаметром 2,5...8,0 мм, то есть, всего размерного сортамента, обрабатываемого на созданной технологической линии. Причем малые величины амплитуды знакопеременного изгиба используются при обработке больших профилеразмеров заготовки, большие амплитуды – при обработке заготовки малых диаметров.

Очищенная от окалины заготовка перемещается в устройство для нанесения подсмазочного слоя на ее поверхность. Для обеспечения надежного нанесения подсмазочного слоя на поверхность заготовки всего размерного сортамента это устройство выполнено с возможностью регулирования длины его рабочей зоны в пределах 150 – 890 мм. Причем обработку больших профилеразмеров заготовки осуществляют при максимальной длине рабочей зоны устройства. С уменьшением профилеразмера заготовки уменьшают длину рабочей зоны устройства.

Обработанную на технологической линии подготовки металла к холодной деформации заготовку сматывают в мотки или на катушки с помощью намоточного устройства.

Полученная заготовка с заданной структурой металла, сформированной в процессе термической обработки, без окалины на ее поверхности, с нанесенным подсмазочным слоем подготовлена к последующему холодному деформированию.

Таким образом, предложенные нетрадиционные технические решения обеспечивают многовариантную подготовку металла к последующему холодному деформированию, включая формирование требуемой структуры и механических свойств, эффективное бескислотное удаление окалины с поверхности металла, нанесение, при необходимости, подсмазочного слоя на поверхность металла и пр., с одновременным уменьшением затрат времени, материальных и энергетических ресурсов на осуществление этой подготовки. В целом, это позволяет получить требуемый результат – повысить качество подготовки металла к последующему холодному деформированию и, как следствие, повысить качество холоднодеформированных профилей, получаемых из этого металла, без ухудшения экологической ситуации на технологическом участке, особенно в условиях неспециализированного производства.

#### Выводы

1. Технология газозащитного патентирования, отработанная на созданном экспериментальном технологическом участке для подготовки стальных заготовок к холодной деформации, обеспечивает получение микроструктуры и механических свойств проволочной заготовки, аналогичных микроструктуре и механическим свойствам той же заготовки после традиционного патентирования в расплаве соли или свинца.

2. Идентичность микроструктуры и свойств проволочной заготовки после газозащитного и традиционного патентирования приводит к одинаковому характеру изменения свойств в процессе холодной пластической деформации.

3. Технология газозащитного патентирования обеспечивает достижение требуемых по ТУ У.00235878.003–98 прочностных и пластических свойств холоднокатаной стальной ленты, используемой ОАО "Одесский завод поршневых колец", для изготовления поршневых колец двигателей внутреннего сгорания.

4. Реализация проекта в условиях интегрированных металлургических предприятий позволит уменьшить выход некондиционной продукции по структуре и свойствам, а в условиях неспециализированных производств, в том числе на потребляющих машиностроительных предприятиях, позволяет организовать производство новых видов продукции при ее широком ассортименте, но относительно малых объемах потребления.

**Список литературы:** 1. Мазур В.Л., Деркач Д.А., Иванов А.А. Состояние и перспективы прокатного производства Украины // Теоретические проблемы прокатного производства: Труды IV международной научно-технической конференции. – Днепропетровск: НМетАУ, Металлургии-

ческая и горнорудная промышленность. – 2000. - № 8, 9. –с. 87-11. 2. Жучков С.М. Проблемы сортопрокатного и метизного переделов в научных исследованиях и разработках Института черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины // Удосканалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні. – Краматорск: ДДМА. – 2002. –с. 40-47. 3. Коновалов Ю.В. Черная металлургия Донбасса: ретроспектива – перспектива. // Удосканалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні. – Краматорск: ДДМА. – 2002. –с. 66-73. 4. Гулько В.И., Войцеховский В.А., Григорьев А.К. Производство профилей и проволоки в роликовых волоках. – Ижевск: «Удмуртия», 1989. – 132с. 5. Калибрование фасонных профилей. В.Н. Аргунов, М.З. Ерманык, А.И. Петров, М.В. Харитонович. – М.: Металлургия, 1989. – 208с. 6. Создание энергосберегающего и экологически чистого участка подготовки металла для холодной деформации в профили простых и сложных сечений /С.М. Жучков, Е.В.Барышев, А.П.Лохматов, В.А.Луценко, К.Ю. Ключников // Наука та іновації. – 2009. № . – с. 7. Комплексная технология производства высокоточных профилей для изготовления высокостойких поршневых колец двигателей внутреннего сгорания С.М. Жучков, Ю.Н. Голованов, Е.В. Барышев, К.Ю. Голованов, К.Ю. Ключников / Збірник наукових праць "Металургійна наука – підприємствам Придніпров'я", другий випуск, Дніпропетровськ "Системні технології". - 2005. – С. 30-37. 8. Анализ напряженно-деформированного состояния металла металла при волочении круглой заготовки в свободно вращающихся валках с гладкой бочкой / С.М. Жучков, А.П. Лохматов, Ключников, Ю.В. Кармазина / Науковий журнал "Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні", № 1, Запоріжжя. – 2008. – С. 106-111. 9. Формирование структуры и свойств катанки при охлаждении высокоскоростным воздушным потоком / Марцинив Б.Ф., Горбанев А.А., Борисенко А.Ю. и др // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2001. – № 6. – С. 66 – 70. 10. Современные научные и технологические аспекты производства высокоэффективных видов катанки различного назначения / Луценко В.А., Парусов Э.В., Тищенко В.А, Кекух В.А, Сычков А.Б., Костенко Ю.Д. //Металлургическая и горнорудная промышленность. Дн-ск. – 2005. - №1. – С.58-73.

### УДК 621.771.63;621.981.3

**ТРИШЕВСКИЙ О.И.**, докт. техн. наук, проф, ХНТУСХ им.П.Василенко,  
**ГОНЧАРЕНКО Е.А.**, аспирант, ХНТУСХ им.П.Василенко, г.Харьков  
**ПАЧКАЕВ Д.П.**, студент, ХНТУСХ им.П.Василенко, г.Харьков

### **НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБЛЕГЧЁННЫХ ПРОФИЛЕЙ ДЛЯ ТЕПЛООБМЕННИКОВ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИХ ПРОМЫШЛЕННОМУ ПРОИЗВОДСТВУ**

Разработана и опробована новая технология изготовления облегчённых профилей для спиральных теплообменников, получен экспериментальный профиль. Рассмотрены результаты исследований усилий и крутящих моментов при формовке облегчённых панелей спиральных теплообменников, предложен состав оборудования специализированной линии для их производства.

Ключевые слова: валковая формовка, гофр, рифление, калибровка валков, энергосиловые параметры, специализированная установка, состав оборудования.

Розроблена та випробована нова технологія виготовлення полегшених профілів для спіральних теплообмінювачей, отриманий експериментальний профіль. Розглянуті результати досліджень зусиль та моментів, що крутять, при формуванні полегшених панелей спіральних теплообмінювачей, запропонований склад обладнання спеціалізованої лінії для їх виготовлення.

Ключові слова: валкове формування, гофр, рифлення, калібрування валків, енергосилові параметри, спеціалізована установка, склад обладнання.

The results of researches of efforts and twisting moments are considered at manufacture of the facilitated panels spiral heat-exchangers and the structure of the equipment of the specialized line for their manufacture is offered.

Key words: cold roll forming, corrugation, spiral heat-exchangers, structure of the equipment, specialized line.

## 1. Введение

Одной из первоочередных задач, стоящих перед конструкторами при разработке машин и механизмов новой техники является, наряду с созданием рациональных конструкций, снижение металлоемкости изделий. Решение этой задачи позволяет, как повышать технико-экономические показатели создаваемых машин при их эксплуатации, так и рационально использовать не восполняемые природные ресурсы, например, железную руду, являющуюся исходным сырьем для производства стали – основного конструкционного материала современности.

## 2. Постановка проблемы

Задача снижения металлоемкости конструкций вызывает необходимость при их разработке использовать специальные технические решения, а также создавать технологии, позволяющие повысить прочность, жесткость и несущую способность новой техники.

Отмеченное в полной мере относится к конструкциям различного типа теплообменников, применяющихся в химическом машиностроении. В настоящее время наиболее распространены два вида теплообменников, используемых в котельных установках: трубчатые и регенеративные воздухоподогреватели.[1] Трубчатые теплообменники громоздки. Для уменьшения их габаритов необходимо переходить к трубам малого диаметра, что возможно до определенного предела, ниже которого возникают трудности технологического порядка.

Регенеративные теплообменники более компактные. Принцип их действия основан на прохождении потоков охлаждающей среды по каналам сердечника, находящегося в корпусе теплообменника. Известны конструкции спиральных теплообменников непрерывного действия, в которых охлаждающая среда подается в сердечник 1 через вводной штуцер 2, проходя между его каналами 3 охлаждается, передавая тепло стенкам и корпусу сердечника и охлажденная выходит через отводной штуцер 4 (рис. 1). Недостатком такой конструкции является ограниченная поверхность теплопередачи.

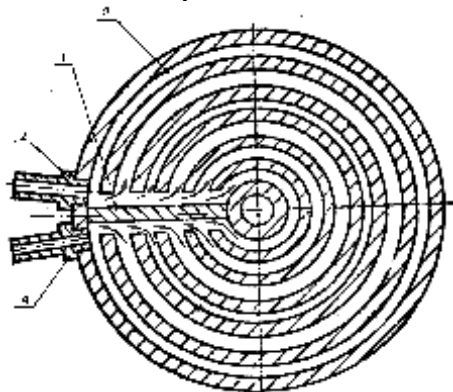


Рис. 1 Спиральный теплообменник непрерывного действия.

Одним из возможных путей усовершенствования таких теплообменников является увеличение поверхности теплообмена сердечника при одновременном снижении его веса, за счет уменьшения толщины стенки (перегородок).

В работах [2,3] приводятся результаты исследования технологии предварительного упрочнения участков листовой заготовки для изготовления швеллера, корытного и других типов

гнутых профилей за счет предварительной формовки на них рифлений.

Данная технология позволила вследствие деформационного упрочнения повысить предел текучести и временное сопротивление разрыву и за счет этого изготавливать профили на 20÷30% более легкие и равнопрочные обычным не упрочненным профилям. Использование подобной технологии позволяет, как снизить толщину листового материала, применяющегося для изготовления сердечника теплообменника за счет нанесения на его участках мелких рифлений, так и повысить теплоотдачу такого сердечника за счет увеличения площади его стенок.

Таким образом, для совершенствования конструкции и повышения эффективности работы регенеративных теплообменников необходима разработка новой технологии изготовления их сердечников. Такая технология должна предусматривать предварительную формовку за счет местной вытяжки металла на листовой заготовке в валках упрочняющих стенки сердечника и увеличивающих их площадь рифлений и последующую завивку гибкой упрочненной заготовки в двухвитковую спираль для образования непосредственно сердечника теплообменника.

В соответствии с габаритами существующих теплообменников была разработана конструкция профиля заготовки для изготовления его облегченного сердечника (рис. 2).

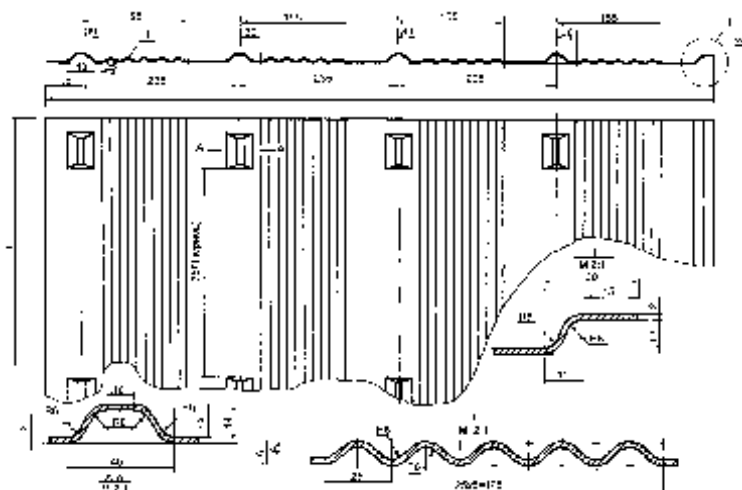


Рис.2 Профиль теплообменника

Профиль представляет собой лист шириной 990 мм из нержавеющей стали 12Х18Н10Т толщиной 2 мм с односторонней отбортовкой высотой 12 мм. По ширине профиля расположены четыре одинаковых участка, содержащие группу из пяти продольных рифлений высотой 4 мм и шириной 25 мм. На плоских участках профиля между рифлениями с периодом 350 мм нанесены небольшие продольные периодически повторяющиеся рифты высотой 12 мм, длиной 50 мм, которые при последующей завивке плоской заготовки в двухвитковую спираль играют роль проставок, обеспечивающих равномерность зазора между соседними витками спирали.

Поскольку габаритные размеры профилей превышают размеры штампового пространства выпускаемого прессового оборудования, то изготовление их методом штамповки не представляется возможным. Учитывая это, был разработан новый технологический процесс изготовления профилей заготовки сердечника радиаторов формовкой в валках высокопроизводительных формовочных станков.

Отработка новой технологии изготовления облегченных сердечников, исследования энергосиловых параметров процесса формообразования, качества полученных профилей и их механических характеристик производились на профилегибочном стане  $1\div 4\times 50\div 300$ . В качестве экспериментального профиля был принят правый характерный элемент профиля сердечника теплообменника шириной 285 мм, содержащий одностороннюю отбортовку, пять продольных рифлений и один ряд периодически повторяющихся в продольном направлении рифтов.

Принимая во внимание, что формообразование рифлений и рифтов за счет местного утонения материала заготовки сопровождается значительными усилиями деформирования, действующими на рабочие валки, при разработке технологии было предусмотрено формовку пяти рифлений, рифтов и отбортовки на заготовке производить во избежание перегрузки клетки в два этапа:

– **на первом этапе** производить предварительную одновременную формовку 5 рифлений, рифтов и отбортовки, на половину высоты соответствующего элемента на готовом профиле: рифления и рифты формовать за счет местной вытяжки металла заготовки радиусами R6, R11, и высотой 2,5 мм и 6 мм соответственно. Причем, на первом этапе рифт формовать полукруглой формы на всю длину заготовки (т. е. сквозным, а не периодически повторяющимся).

– **на втором этапе** производить окончательную доформовку до заданной высоты рифлений, рифтов и отбортовки (4 и 12 мм соответственно), причем, доформовку рифтов осуществлять за счет местной вытяжки металла при совмещении выпуклого элемента нижнего валка с соответствующей впадиной верхнего валка. При этом синхронизация вращения валков в данной клетки обеспечивалась шестеренной парой с передаточным отношением 2.

Таким образом, при формообразовании рифтов на втором этапе формовки периодически осуществляется их доформовка на заданную чертежом высоту, а также осадка и разглаживание отформованного на первом этапе сквозного рифта до плоского участка на промежутках профиля между рифтами.

Разработанная для осуществления данной технологии калибровка валков приведена на рис. 3.

После завалки в рабочие клетки стана  $1\div 4\times 50\div 300$  валков, изготовленных и собранных согласно калибровке (рис. 3) было произведено опытное профилирование. Визуальный осмотр показал качественное состояние поверхности профилей. Трещин и рисок не наблюдалось. Размеры профилей соответствовали размерам чертежа.

При последующей навивке полос в спираль сердечника на специальной установке наблюдались следующие дефекты:

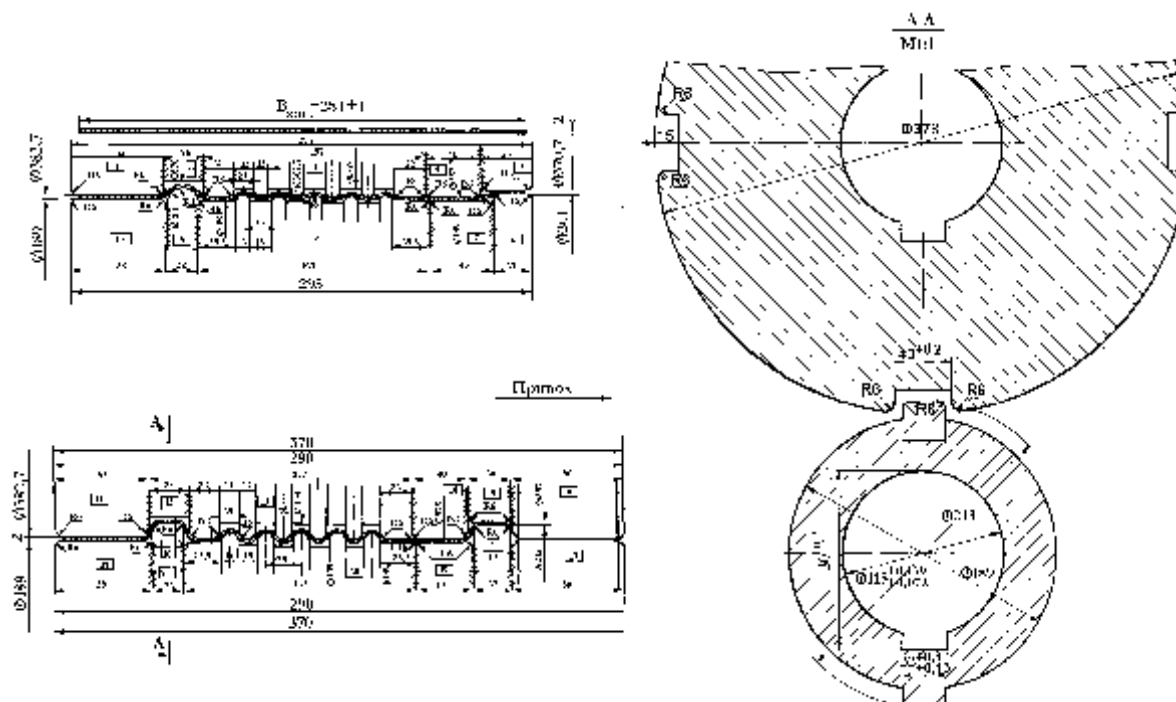


Рис.3 Калибровка валков экспериментального профиля теплообменника

1. Вследствие близкого расположения (30 мм) рифта от кромки полосы наблюдалась волнистость боковых кромок, достигающая величины 5 мм. Для устранения этого дефекта необходимо увеличить расстояние рифтов до кромки полосы, зеркально поменяв местами на профиле участки рифлений с участками, на которых нанесены периодические повторяющиеся рифты.

2. Формовка рифлений в валках, имеющих разные наружные диаметры, сопровождается изгибом заготовки в сторону валков, имеющих меньший диаметр. Для устранения этого дефекта при промышленном производстве подобных профилей формовку рифлений необходимо производить в валках равного диаметра.

3. При навивке наблюдался изгиб полосы в районе расположения рифтов. Изгиб был вызван частично близким расположением рифта к кромке профиля, а в основном большим расстоянием между рифтами в продольном направлении. Для устранения этого дефекта рифт был удален от кромки профиля и произведена корректировка калибровки валков. Корректировкой предусматривалось в два раза уменьшить период расположения рифтов.

После устранения этих недостатков и корректировки калибровки валков было произведено повторное профилирование полосы. В результате был получен профиль, соответствующий требованиям чертежа. С учетом результатов опробования по скорректированной калибровке валков на профилегибочном стане 1-4x50-300 из стали 12X18Н10Т были изготовлены полосы для изготовления сердечника теплообменника (длиной по 10 м) и произведена навивка их на специализированной установке (для изготовления сердечников спиральных теплообменников). Навивка полос показала положительные результаты, что позволяет рекомендовать разработанный технологический процесс к промышленному внедрению.

Для получения дополнительных сведений о новом технологическом процессе, служебных свойствах изготовленных по нему профилей, которые необходимы для правильного выбора и проектирования технологического оборудования, определения возможности совмещения процесса формообразования гофров с процессом на-

вивки готовой полосы были проведены дополнительные экспериментальные исследования.

**Целью** исследований являлось определение энергосиловых параметров формообразования модели профиля теплообменника 990x4x350x12x2 мм, а также деформированного состояния металла полученных профилей.

В соответствии с разработанной технологией формовка рифлений и рифтов производилась в двух клетях стана, а навивка профилей – в третьей клетки. Измерение давлений металла на валки выполнялось с помощью месдоз мембранного типа, устанавливаемых под нажимные винты клеток стана. Эти месдозы мало чувствительны к перекоосу подушек валков и установке не по центру нажимного винта клетки. Тарировка месдоз проводилась предварительно на эталонном прессе.

При скручивании шпинделя наибольшие поверхностные деформации направлены под углом  $45^{\circ}$  к его оси. По каждой из этих осей на шпиндель наклеивались по два соединённых последовательно датчика, образующих одно из плечей измерительного полумоста. Съём сигналов с вращающегося шпинделя производился при помощи струнного токосъёмника. Шпиндели тарировались с помощью рычага и груза. Все измерения производились с помощью тензометрической станции «Топаз-1» (точность измерений  $\pm 2\%$ ) и шлейфового осциллографа Н-700 (точность измерений  $\pm 3\%$ ).

Для определения энергосиловых параметров процесса формовки рифлений на профилях были измерены усилия в валках двух первых клеток и крутящие моменты на верхнем и нижнем шпинделях валков, а также момент на шпинделе смотки в третьей клетки. Для сравнения исследования энергосиловых параметров проводились как на профилях из легированной стали 12Х18Н10Т, так и из обычной углеродистой стали Ст.3.

Полученные после расшифровки осциллограмм значения усилий и крутящих моментов приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Значения энергосиловых параметров формообразования панелей спиральных теплообменников

| Профилируемая заготовка     | № клетки | Усилие, Р (н) | Момент на верхнем шпинделе $M_B$ (Нм) | Момент на нижнем шпинделе $M_H$ (Нм) | Момент на шпинделе смотки $M_{CM}$ (Нм) |
|-----------------------------|----------|---------------|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|
| 1                           | 2        | 3             | 4                                     | 5                                    | 6                                       |
| Нержавеющая сталь 12Х18Н10Т | 1        | 35500         | 210                                   | 680                                  | —                                       |
|                             | 2        | 90000         | —                                     | 1200                                 | 3400                                    |
| Сталь Ст.3                  | 1        | 20000         | 210                                   | 300                                  | —                                       |
|                             | 2        | 51000         | —                                     | 910                                  | —                                       |

Максимальные усилия при формовке рифлений и рифтов на заготовке панелей облегчённых спиральных теплообменников из нержавеющей стали 12Х18Н10Т составляют для первой клетки 35,5кН, для второй клетки – 90 кН, что на 77% и 76% превышает максимальные значения этих параметров при формовке профилей из стали Ст.3. Максимальные значения крутящего момента зафиксированы во второй формирующей клетки стана – 1200 Нм для стали 12Х18Н10Т и 910 Нм для стали Ст.3 соответственно. Проведенные исследования показали, что по разработанной технологии

профиль панели облегчённого спирального теплообменника из нержавеющей стали 12X18H10T может быть освоен в промышленности на специализированной формовочно-завивочной линии.

Поскольку формообразование упрочняющих профиль сердечника теплообменника рифлений по разработанной технологии осуществляется за счёт местной вытяжки, т.е. утонения металла, с целью установления эксплуатационных характеристик полученной продукции было исследовано деформированное состояние по толщине профиля. Деформации по толщине металла (утонение) определялись путём замера резьбовым микрометром толщин металла по контуру профиля и сравнения их с толщинами в тех же точках на плоской заготовке до профилирования. Установлено, что максимальных величин утонение металла достигает в местах вытяжки по углам вершин рифтов и достигает 24%. На плоских участках утонение отсутствует. В связи с большой величиной утонения было решено на выпуклых формующих элементах рифтов произвести скругление большим радиусом (12мм вместо 6мм) т.е. максимально приблизиться к сферической поверхности рифтов. Повторная формовка рифтов со скорректированными формующими элементами показала, что утонение на вершинах рифтов уменьшилось с 24% до 16%, что удовлетворяет условиям эксплуатации. Утонение же на вершинах упрочняющих рифлений не превышало 6 – 7%. Полученные результаты дают основание положительно оценить разработанную технологию, так как она позволяет получать качественные профили без трещин и разрывов.

Таким образом, положительные результаты, полученные при освоении экспериментального профиля, а также данные исследований энергосиловых параметров процесса и деформированного состояния готовых профилей позволяют рекомендовать разработанный технологический процесс с некоторыми добавлениями для реализации в промышленных условиях на проектируемой специальной линии (рис.4). Учитывая, что в конструкции сердечника спирального теплообменника используется двухвитковая спираль, формовка упрочнённых заготовок для создания такого сердечника в предлагаемой линии осуществляется одновременно на двух участках навстречу друг другу.

В качестве исходного материала для формовки промышленных профилей сердечников спиральных теплообменников должна применяться нержавеющая рулонная сталь 12X18H10T толщиной 2 мм, поставляемая в рулонах шириной 1000 мм. Рулоны со склада заготовок доставляются к накопителю, обеспечивающему необходимый их запас для загрузочного устройства.

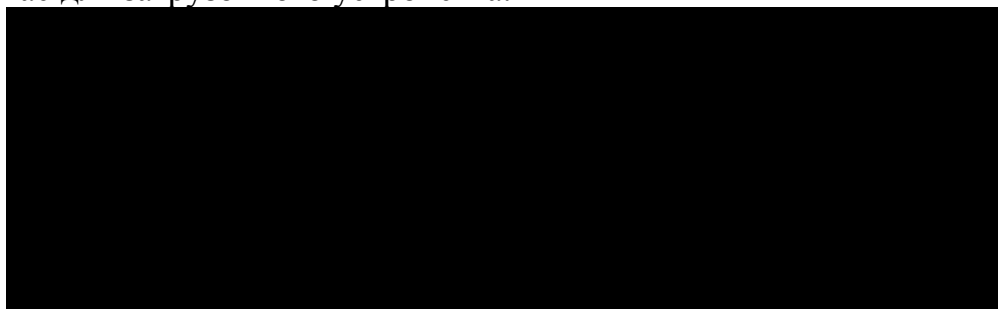


Рис.4 Специализированная линия для формовки и навивки профилей в теплообменники

Загрузочное устройство (1) передаёт рулон от накопителя на барабан разматывателя (2). Разматыватель предназначен для приёма рулона, подлежащего обработке на линии, разворота его в положение удобное для отгибки переднего конца полосы,

удерживания вращающегося рулона во время разматывателя полосы и создания требуемого натяжения. Далее по технологическому циклу заготовка передаётся в правильную машину (3), которая предназначена для предварительной правки металла в холодном состоянии после размотки и должна обеспечить плоскостность заготовки в соответствии с требованиями ГОСТ 19904-90 (нормальная плоскостность).

После правки полоса поступает в гильотинные ножницы (4), где обрезается деформированный передний и задний концы рулона, вырезаются дефектные участки, производится порезка полосы на мерные длины перед задачей её в формовочный стан. Ножницы должны быть оборудованы устройствами для удаления обрезки. Для сброса обрезков полосы в эти устройства ножницы могут быть дооборудованы откидными столами.

Затем полоса через задающее устройство, представляющее собой две пары не приводных вертикальных роликов (5) задаётся в рабочие клетки (6) формовочного стана. Количество рабочих клеток с каждой стороны от завивочного устройства обусловлено получением качественных профилей заданной конфигурации и для случая формовки профиля сердечника теплообменника составляет по 3 двухвалковые клетки открытого типа с каждой стороны. Регулировка положения верхних валков по высоте осуществляется нажимным и уравнивающим устройствами. Привод нажимных винтов – механический, обеспечивающий одновременное и раздельное вращение винтов. Передаточное отношение между валками равно единице. Привод стана групповой от электродвигателей.

Учитывая, что экспериментальные исследования энергосиловых параметров процесса проводились на модели профиля, составляющей четвертую часть сечения промышленного профиля, максимальное усилие формовки, развиваемое в формующей клетки, должно быть не менее 360 Кн. Основные диаметры верхних и нижних рабочих валков в каждой клетки должны быть одинаковыми и выбираться с учётом формовки рифтов и отбортовок высотой до 20 мм. Максимальный крутящий момент на валах клеток – 2,3 кНм.

Расположенное далее по ходу технологического цикла устройство для натяжения полосы (7) предназначено для равномерной и качественной смотки полосы в сматывающем устройстве.

Центральным механизмом новой технологической линии является сматывающее устройство (8). Оно предназначено для смотки движущихся навстречу друг другу полос в оболочку двухвиткового спирального теплообменника. В устройстве должна быть предусмотрена автоматическая сварка передних концов отформованных полос и зажатие участка сваренного профиля до начала завивки двухвитковой спирали. Крутящий момент на шпинделе сматывающего устройства для навивки полного профиля должен быть не менее 14 кНм. При навивке полос устройство должно обеспечивать создание равномерного зазора между полосами на протяжении всего процесса, лёгкий съём навитого сердечника теплообменника с устройства, надёжное и быстрое крепление задних концов двухвитковой спирали на оболочке.

Все технологические операции, выполняемые на специализированной линии, должны быть механизированы с полным исключением ручного труда на всех основных и вспомогательных операциях.

### **Выводы**

Таким образом, выполненные исследования позволили: разработать новый тип облегчённого профиля для спиральных теплообменников, принципиально но-

вую технологию его формообразования в валках формовочного стана, получить в процессе отработки технологии экспериментальные профили, установить, что по качественным показателям они удовлетворяют условиям эксплуатации сердечников спиральных теплообменников. Полученные значения энергосиловых параметров процесса формообразования профилей позволяют выполнить силовой расчёт проектируемого для изготовления сердечников теплообменников специального оборудования. Определён предварительный состав специализированной линии для выпуска подобной металлопродукции, который может быть использован при проектировании оборудования.

**Список литературы:** 1. Капавец, Г. Е. Теплообменники и теплообменные системы.[Текст] / Г.Е.Капавец. –К: Наук. думка, 1981.– 272с. 2. Тришевский О.И., Томенко Ю.С., Полстянкин Е.Г., Крюк А.Г. Упрочнение гнутых профилей и повышение жёсткости путём рифления их плоских элементов. // Кузнечно-штамповочное производство. 1988. №12. С.19-21. 3. Тришевский О.И., Полстянкин Е.Г., Дебердеев Р.Ю., Янчинский А.П., Томенко Ю.С. Снижение металлоёмкости гнутых профилей за счёт деформационного упрочнения. // Metallurg. 1988. №8. С.36-37.

**УДК 621.771.2**

**ЧУМАКОВ В.П.**, инженер – металлург, старший преподаватель КМФ НМетАУ, г. Кривой Рог

**КОРЕНКО М.Г.**, магистр металлургии, заведующая лабораториями кафедры Процессов и машин обработки давлением КМФ НМетАУ, г. Кривой Рог

**СТАРОСТА Н.В.**, специалист металлургии, ассистент кафедры Процессов и машин обработки давлением КМФ НМетАУ, г. Кривой Рог

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ТОРЦОВ БЛЮМОВ ПРИ ПРОКАТКЕ НА ЗАГОТОВОЧНЫХ СТАНАХ**

Рассмотрен процесс формоизменения торцов раската при прокатке на непрерывно-заготовочном стане. Предложена технология подготовки блюда к последующей прокатке на непрерывно-заготовочном стане.

Ключевые слова: Слиток, блюм, заготовка, расход металла, очаг деформации.

Розглянутий процес змінення форми торців розкату при прокатці на безперервно – заготівельному стані. Запропонована технологія підготовки блюма до подальшої прокатки на безперервно – заготівельному стані.

Ключові слова: Злиток, блюм, заготівка, витрату металла, осередок деформації.

The process of change of form of butt ends of roll is considered at rolling on a continuous-purveyance figure. Technology of preparation of bloom is offered the subsequent rolling on a continuous-purveyance figure.

Keywords: Bar, bloom, purveyance, threw an expense, hearth of deformation.

### **1. Введение**

Технология подготовки блюда предусматривает зачистку дефектов расположенных на концах блюда в виде усадочной раковины, рыхлости в головной части и накатов в донной части. При этом значительная часть металла уходит в обрезь. Изучение и определение характера течения металла в очаге деформации с целью уменьшения расхода металла является актуальной темой.

## 2. Постановка проблемы

На современном этапе развития черной металлургии сокращение расхода металла на первых этапах прокатного производства является наиболее эффективным особенно при производстве сортовой заготовки. Одним из основных показателей, который определяет расход металла в прокатном производстве, является технологическая обрезь, отбираемая в технологическом потоке обжимных цехов. Количество обрезки, отбираемой в технологическом потоке при прокатке, зависит как от качества самого слитка поступающего из сталеплавильного цеха, так и от технологии, принятой в конкретном обжимном цехе.

Расход металла по технологии производства сортовой заготовки, согласно которой обработка слитка проводится по схеме: прокатка в обжимной клетки, полное удаление на ножницах дефектных концов блюмом, дальнейшая прокатка их на непрерывно-заготовочном состоянии (НЗС), зачистка концов и порезка на мерные длины заготовок составляет порядка 1,12 т/т. [1]. При этом удаление концов блюма обусловлено следующими причинами. В головной части раската необходимо удалить прибыльную часть, структура металла которой неудовлетворительна. Величину донной обрезки определяет, длина накатов, которые образуются при прокатке в обжимной клетки. При этом расходный коэффициент металла составляет 1,07 т/т [1].

При прокатке на непрерывно-заготовочных станах отношение продольно-вертикальных размеров очага деформации находится в пределах  $0,5 \leq \frac{l_a}{h_{cp}} \leq 0,8$  [2]. Про-

катка с таким отношением продольно-вертикальных размеров очага деформации согласно классификации Чекмарева А.П. [3] относится к третьему типу и имеет свои особенности. Главной особенностью такого типа прокатки является полное распространение пластической деформации на всю высоту прокатываемой полосы. При этом в центральной части межкристаллическое трение становится меньше чем в приконтактных слоях раската и пластическая деформация средних слоев раската становится больше и на троне раската появляется выпуклость. Сущность этого процесса зависит от высоты прокатываемого слитка и диаметра валков, а также от технологических условий прокатки.

Для определения характера распространения пластической деформации при прокатке воспользуемся решением задачи А.Д. Томленова [4] по внедрению тупого пуансона в пластическую среду. Для случая прокатки примем следующие допущения. Дугу захвата заменим хордой, участок прилипания распространяется на всю дугу захвата, а процесс пластической деформации осуществляется симметрично валками равного диаметра. Деформация металла – двумерная, длина хорды небольшая, по этому, влиянием сил трения на контактной поверхности пренебрегаем.

Используя метод характеристик, для различных значений продольно-высотных отношений геометрического очага деформации построены сетки линий скольжения Рис.1.

Таким образом, получена качественная и количественная картина физического очага деформации при прокатке в валках с гладкой рабочей поверхностью. Рассматривая полученный физический очаг пластической деформации можно сделать следующие выводы.

- При прокатке пластическая деформация распространяется за пределы геометрического очага деформации.

- При отношении продольно-высотных размеров очага деформации  $\frac{l_a}{h_{\text{в}}} = 0,587$

зоны охваченные пластической деформацией смыкаются и при дальнейшем увеличении  $\frac{l_a}{h_{\text{в}}}$  они пересекаются, и продольная пластическая деформация в центральной части раската значительно увеличивается.

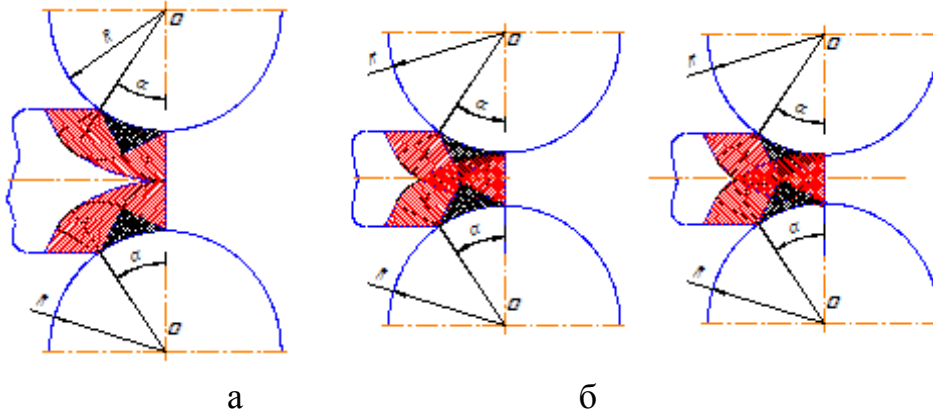


Рис.1-Линии скольжения для разных значений продольно-высотных отношений геометрического очага деформации.

а – при  $\frac{l_a}{h_{\text{в}}} = 0,587$  , б - при  $\frac{l_a}{h_{\text{в}}} = 0,977$  , в - при  $\frac{l_a}{h_{\text{в}}} = 1,028$

- Зоны затруднительной деформации делят очаг деформации на два участка – до входа в валки и выхода из валков.

Из Рис.1б,в видно, что пластическая деформация в участках до входа в валки развивается в зависимости от увеличения продольно-высотных размеров очага деформации. Это свидетельствует о том, что при освобождении очага деформации на торце раската возникает выпуклость.

Для проверки теоретических выводов были проведены опыты на лабораторном прокатном стане с диаметром валков 127мм Криворожского металлургического факультета Национальной металлургической Академии Украины прокаткой образцов изготовленных из свинца. Моделирование процесса прокатки на непрерывно-заготовочном стане в лабораторных условиях подтвердили теоретические выводы и ранее проведенные исследования в промышленных условиях при прокатке на НЗС 730/500 цеха блюминг №1и НЗС 900/700/500 цеха блюминг №2 комбината «Криворожсталь» [5].

Для решения проблемы сокращения расхода металла при производстве сортовой заготовки была разработана технология подготовки блюмов перед прокаткой в непрерывно-заготовочном стане [6].

Разработанная технология подготовки блюмов перед прокаткой в непрерывно-заготовочном стане достигается тем, что после прокатки в обжимной клети обрезку конца блюма (соответствующую донной части слитка) с накатами производят не полностью после чего блюм разрезают на две части. Часть раската с оставленным дефектом задают в непрерывно-заготовочный стан таким образом, чтобы оставленный дефект находился сзади. блюма. разворачивают на поворотном столе перед БЗС на 180°. Оставленный на конце раската дефект при порезке на ножницах блюминга, выходит на торец заготовки и удаляется на ножницах НЗС.

## Выводы

Разработанная технология подготовки блюмов перед прокаткой в непрерывно-заготовочном стане позволит за счет не полного удаления дефекта на конце блюма который соответствует донной части слитка снизить расходы металла на производство прокатной продукции.

Расчеты показывают, что внедрение разработанной технологии подготовки блюмов перед прокаткой в непрерывно-заготовочном стане при производстве сортовой заготовки, позволит снизить расход коэффициент металла на  $3 \div 7\%$ , что улучшает технико-экономические показатели обжимных цехов.

**Список литературы:** 1. В.В.Гетманец, О.В.Филонов, В.П.Чумаков. Оптимизация отбора технологической обрезки в потоке обжимных станов. Сталь 1981г. №6. С.48-49. 2. Чумаков В.П., Коренко М.Г. Пути снижения расхода металла при прокатке на блюминге. Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2009.- №2. – с.39-42. 3. А.П.Чекмарев, В.Л.Павлов, В.И.Мелешко, В.А.Токарев. Теория прокатки крупных слитков. Изд-во «Металлургия», 1968, с. 252. 4. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов. «Металлургия» 1972. с.408. 5. А.с. СССР № 797810 Способ формирования концов заготовок. В.В.Гетманец, В.П.Чумаков, В.Д.Гладуш, А.Н.Белозеров, И.Е.Полуновский, В.А.Чеголя. кл. В 21 В 1/02 опубл. 23.01.81. бюлл. №3. 6. Пат.43974 Україна МПК (2009.01) В21В 1/02 Спосіб підготовки блюма до прокатки, В.П.Чумаков, М.Г.Коренко, Н.В.Староста опубл. 10.09.2009. бюлл. №17.

**УДК 621.771.2**

**ЧУМАКОВ В.П.**, инженер – металлург, старший преподаватель КМФ НМетАУ, г. Кривой Рог

**КОРЕНКО М.Г.**, магистр металлургии, заведующая лабораториями кафедры Процессов и машин обработки давлением КМФ НМетАУ, г. Кривой Рог

## **К ВОПРОСУ ВЫБОРА ФОРМЫ ДОННОЙ ЧАСТИ УШИРЕННОГО КНИЗУ СЛИТКА**

Проведен анализ основных причин образования накатов при прокатке крупных слитков на блюминге и установлена зависимость образования наплывов от определенных факторов. Разработана методика определения формы и размеров донной части уширенного книзу слитка.

Ключевые слова: Слиток, блюм, заготовка, расход метала, очаг деформации, пластическая деформация.

Проведений аналіз основних причин утворення накатів при прокатці крупних злитків на блюмінгу і встановлена залежність утворення напливів від певних чинників. Розроблена методика визначення форми і розмірів донної частини розширеного донизу злитка.

Ключові слова: Злиток, блюм, заготівка, витрату метала, осередок деформації, пластична деформація.

The analysis of principal reasons of formation of calumny is conducted at rolling of large bars on blooming and dependence of formation of influxes is set on certain factors. The method of determination of form and sizes of the ground part of extended the bottom bar is developed.

Keywords: Bar, bloom, purveyance, threw an expense, hearth of deformation, flowage.

## **1. Введение**

Физическая природа образования накатов при прокатке крупных слитков заключается в неравномерной деформации по высоте и ширине раската в период заполнения и освобождения очага деформации, т.е. при неустановившемся процессе

прокатки. Изучение формоизменения металла при прокатке на блюминге с целью, поиска возможностей снижения расхода металла в обреш является весьма актуальным.

## 2. Постановка проблемы

Увеличение выхода годного металла в цехах прокатного передела неотъемлемо связано с внедрением новых технологий, направленных на снижение металлоотходов и удовлетворение требований потребителя к качеству металлопродукции. Основным фактором, определяющим уровень техники и технологии производства полупродукта, является величина отбираемой технологической обреш при зачистке блюмов перед прокаткой на заготовочных станах [1].

Применение уширенных книзу слитков с рациональной формой его донной части [2] позволяет, значительно сократить расход металла на первой стадии прокатного передела при производстве полупродукта (блюмов).

Одними из способов позволяющими решить поставленную задачу в области увеличения выхода годного металла является формирование концов заготовок перед прокаткой на заготовочном стане [3,4].

При прокатке на блюминге слитков, отлитых традиционным способом в изложницы в результате воздействия различных технологических и физико-механических факторов на торцах полупродукта (блюма) образуются накаты Рис.1, которые перед прокаткой в заготовочном стане отрезают на ножницах. Размеры и вес, отрезаемых концов блюма (соответствующие донной или головной части слитка) зависит от формы и размеров слитка, сортамента и технологии производства, принятых на конкретном обжимном стане и находится в пределах 0,4÷0,7 тонны. Отрезанный металл уходит в технологические отходы и направляется на переплавку в плавильные цеха.

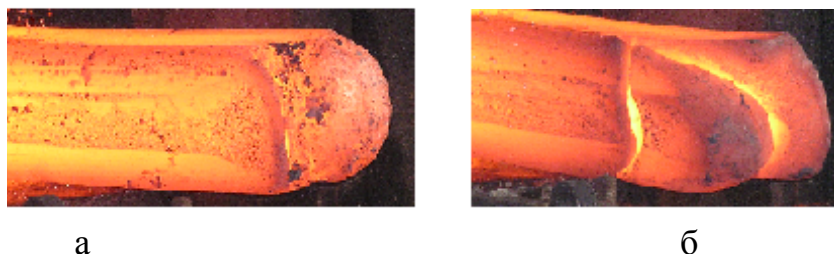


Рис.1- Форма торца блюма после прокатки на блюминге.

а – после прокатки равномерно прогретого слитка без кюмпеля. Величина обреш составляет 0,25м (1,6%);

б – после прокатки неравномерно прогретого слитка с кюмпелем. Величина обреш составляет 0,45м (2,6%);

Анализ исследований проведенных в работах [5-8] показывает, что основной причиной образования накатов при прокатке крупных слитков на блюминге, прежде всего, является неравномерная деформация по высоте слитка. Особенно это явление ярко проявляется в период заполнения и освобождения очага деформации, т.е. при неустановившемся процессе прокатки [9]. Образование наплывов также зависит и от следующих факторов:

- неполное распространение пластической деформации на всю высоту слитка;
- не постоянство коэффициентов деформации во всех направлениях;
- пластических свойств металла, которые в свою очередь зависят от химического состава стали и технологии нагрева;
- параметров очага деформации;
- формы калибра, в котором проводится, пластическая деформация;

- влияние различных технологических параметров прокатки (температуры прокатываемого металла, не равномерность прогрева слитка, скорости деформации, единичного и суммарного абсолютного обжатия и др.).

Для обеспечения более равномерной продольной пластической деформации по всему поперечному сечению раската необходимо в донной части слитка создать искусственный «жесткий» конец Рис. 2, который в момент захвата слитка валками и прокатки до достижения коэффициента формы геометрического очага деформации,  $l_d/h_{cp} = 0,4 \div 0,6$  не подвергнется бы пластической деформации.

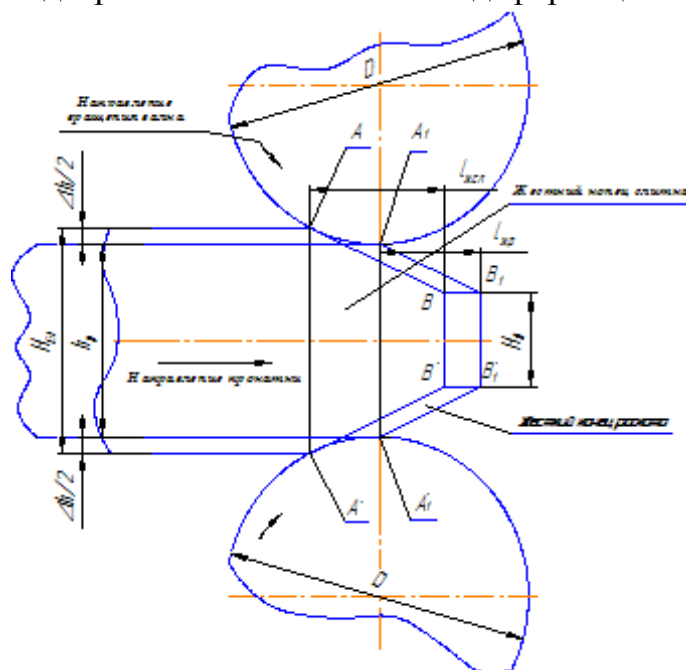


Рис. 2 - Схема прокатки слитка с «жестким» концом.

Пластическая деформация слитка с «жестким» концом происходит следующим образом. При захвате слиток встречается валками в точках A и A', при этом донная часть слитка зайдет в валки без обжатия на величину  $l_{ж.сл.}$ . Таким образом на конце раската искусственно созданный «жесткий» конец длиной  $l_{ж.сл.}$  обеспечивает равномерное продольное течение металла по всему поперечному пересечению раската. При последующем втягивании слитка в валки точки A и A' переместятся в точку A<sub>1</sub> и A'<sub>1</sub>. Обжатие слитка состоится на участке дуг A - A<sub>1</sub> и A' - A'<sub>1</sub>. Присутствие искусственно сформированного переднего «жесткого конца» не дает возможности неравномерного продольного течения металла по высоте раската тем самым противодействует образованию накатов. Аналогичная картина пластического течения металла наблюдается при последующей прокатке, как в прямом, так и в обратном, направлениях.

При достижении высоты раската величины равной высоте нижней части слитка  $H_d$  в результате полного проникновения пластической деформации на всю высоту раската зоны пластичной сливаются. В результате взаимного пересечения зон пластической деформации верхнего и нижнего валков продольная пластическая деформация центральных слоёв металла увеличивается и на торце раската возникает выпуклость.

Для определения размеров «жесткого» конца донной части слитка используем метод смещенного объема Рис.3.

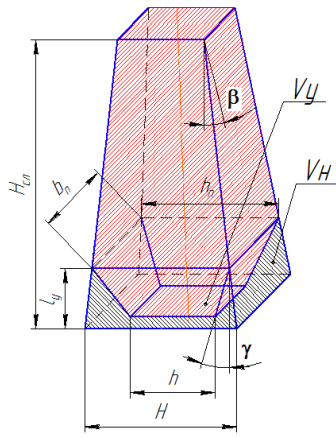


Рис. 3 - Форма слитка с искусственным «жестким» концом.

$\beta$  – угол наклона граней слитка;  $\gamma$  – угол наклона граней «жесткого» конца слитка.

Принимаем, что объем искусственного «жесткого» конца слитка  $V_y$  будет равен разнице объемов металла донной части слитка  $V_{сл.д}$  и объему металла  $V_n$  удаляемого при зачистке конца бьюма

$$V_y = V_{сл.д} - V_n \quad (1)$$

Для определения объема металла образованного наплывами  $V_n$  принимаем, что все четыре наплыва имеют одинаковые размеры и форму в виде половины параболоида длиной  $l_n$ , а ширина и высота бьюма равны между собой  $b_n = h_n$

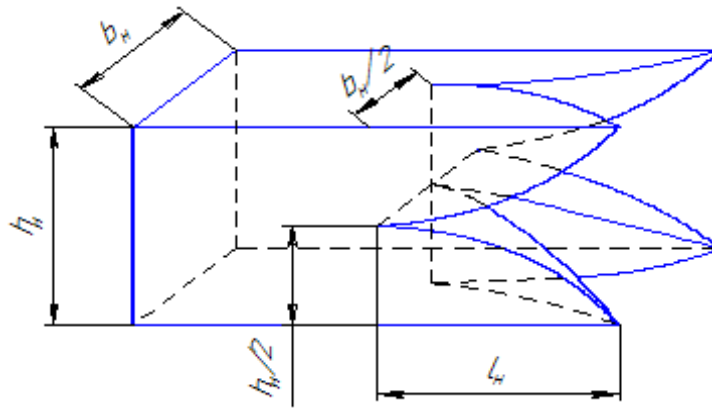


Рис. 3 Расчетная схема для определения объема наплывов.

Тогда объем наплывов (половины параболоида) можно определить по формуле [10]:

$$V_n = 0,262 \cdot h_n^3 \quad (2)$$

Для определения размеров нижнего основания слитка, при котором произойдет полное проникновение высотной пластической деформации на всю высоту раската, принимаем, коэффициент формы очага деформации  $l_d/h_{ср} = 0,5$ . Тогда, размеры нижнего сечения слитка (ширину  $B_d$  и высоту  $H_d$ ) определим по формуле [2]:

$$h = b = D_s \alpha_{ср} + \frac{\Delta h}{2} \quad (3)$$

Здесь  $h$  – высота низа слитка, мм;

$b$  – ширина низа слитка, мм;

$D_s$  - катающий диаметр валков, мм;

$\alpha_{ср}$  - средний угол захвата, рад;

$\Delta h$  - абсолютное обжатие, мм.

При известных углах наклона боковых граней  $\beta$  слитка и «жесткого» конца  $\gamma$  высоту  $l_y$  нижней части слитка определим по формуле:

$$l_y = \frac{(H-h) \cdot \sin(\frac{\pi}{2} - \beta) \cdot \sin(\frac{\pi}{2} - \gamma)}{\sin(\gamma + \beta)} \quad (4)$$

а, объем металла донной части слитка  $V_{сл.д}$  определим по формуле:

$$V_{сл.д} = \frac{l_d}{6} \cdot [HB + (H + b_i) \cdot (B + b_i) + b_i \cdot h_i] \quad (5)$$

Здесь  $b_n$  и  $h_n$  - ширина и высота промежуточного сечения, соединяющего «жесткий» конец слитка с его средней частью.

Принимая, что разность между  $b_n$  и  $h_n$  отличается на величину среднего абсолютного обжатия за один проход их величины можно определить по формулам:

$$h_i = h + 2 \cdot l_d \cdot \operatorname{tg} \gamma \quad \text{и} \quad b_i = b + 2 \cdot l_d \cdot \operatorname{tg} \gamma \quad (6)$$

Для проверки разработанной методики расчета конструктивных параметров донной части слитка были проведены исследования на лабораторном прокатном стане с диаметром валков 127 мм. Для исследований в лабораторных условиях были изготовлены слитки из свинца. Размеры нижней части слитка, выполненной в виде усеченной пирамиды, выполняющая роль искусственного «жесткого» конца, определяли по формуле (3), а угол наклона граней донной части выбран в пределах  $\alpha = 25 \div 28$  градусов [2]. По разработанному режиму обжатия были прокатаны все слитки, моделируя процесс прокатки на блюминге. По результатам лабораторных исследований установлено, что при прокатке слитков с искусственным «жестким» концом, в донной части на торце раската образуется выпуклость Рис.4. Следовательно, величина наката зависит от формы и размеров «жесткого» конца слитка.



Рис. 4 Форма торца раската после прокатки слитка с «жестким» концом в лабораторных условиях.

#### Выводы

1. Основным фактором перехода к сквозной пластической деформации на всю высоту слитка при прокатке на блюминге в основном следует считать отношение продольно-поперечных размеров геометрического очага деформации, который должен, находится в пределах  $0,5 \leq l_d / h_{cp} \leq 0,6$ .
2. Разработанная методика определения формы и размеров искусственного «жесткого» конца уширенного книзу слитка может быть использована для инженерных расчетов.
3. Применение слитков с измененной формой донной частью в виде искусственного «жесткого» конца позволит значительно сократить расход металла, идущего с донной обрезаю.

**Список литературы:** 1. Чумаков В.П., Коренко М.Г. Пути снижения расхода металла при прокатке на блюминге. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2009.- №2. – с.39-42. 2. Пат.38619 Україна МПК (2006) B21B 1/00,B22D 7/00 Сортовой зливков для прокатного стану, Чумаков В.П., Коренко М.Г.. опубл. 12.01.2009. бюлл.№1. 3. А.с. СССР № 797810 Способ формирования концов заготовок., В.В. Гетманец, Чумаков В.П., Гладуш В.Д., Белозеров А.Н., Полуновский И.Е., Чеголя В.А.. кл. В 21 В 1/02 опубл. 23.01.81.бюлл.№3. 4. Пат.43974 Україна МПК (2009.01) B21B 1/02 Спосіб підготовки блюма до прокатки, Чумаков В.П., Коренко М.Г., Староста Н.В. опубл. 10.09.2009. бюлл.№17. 5. Чекмарев А.П., Чехранов В.Д., Павлов В.Л.. Пути уменьшения отходов в обреш при прокатке крупных слитков. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. №1.1972г. с.22-24. 6. Гетманец В.В., Чумаков В.П.. Рациональная конфигурация донной части уширенного книзу сортового слитка. *Бюллетень НТИ*. 1973г. №21,с.23-24. 7. Гетманец В.В., Филонов О.В., Чумаков В.П.. Оптимизация отбора технологической обреш в потоке обжимных станов. *Сталь* 1981г. №6. С.48-49. 8. Никитенко В.И., Чеголя В.А., Стасовский Г.О. и др. Выбор оптимальной формы донной части слитка с целью уменьшения обреш на блюминге. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. №2.1975г. с.82-83. 9. Бобров В.В., Полещук В.М., Гладуш В.Д.. Оптимизация нестационарных процессов прокатки.- Киев: Техника, 1984г.- 129с. 10. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. *Справочник по математике*. М. Изд. «Наука». 1964г.- 608с.

**УДК 621.771.073.8:681.3.06**

**МЕДВЕДЕВ В.С.**, канд. техн. наук, УкрГНТЦ «Энергосталь», г. Харьков

## **РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ СОЗДАНИЯ БАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭКОНОМИЧНЫХ ФАСОННЫХ ПРОФИЛЕЙ ПРОКАТА**

Рассмотрен единый системный подход к теоретическим исследованиям течения металла в сложных фасонных калибрах, разработке методов расчета формоизменения и энергосиловых параметров прокатки, который заключается в едином представлении профилей и формирующих их калибров как совокупности типовых базовых элементов.

Ключевые слова: прокатка, профиль, формоизменение, энергосиловые параметры

Розглянуто єдиний системний підхід до теоретичних досліджень плину металу в складних фасонних калібрах, розробці методів розрахунку формозміни й енергосилових параметрів прокатки, що полягає в єдиному поданні профілів і калібрів, що їх формують, як сукупності типових базових елементів.

Ключові слова: прокатка, профіль, формозміна, енергосилові параметри

The paper considers uniform system approach to theoretical researches of metal flow in complex sectional grooves, development of methods for calculating forming and energy-power parameters of rolling. The approach consists in uniform representation of sections and forming grooves as sets of typical base elements.

Keywords: rolling, section, forming, energy-power parameters

### **1. Введение**

Развитие машиностроения, железнодорожного транспорта, строительства и других отраслей промышленности во многом определяется сортаментом и уровнем качества металлопродукции, изготавливаемой на предприятиях черной металлургии. Необходимость повышения технического уровня машин и оборудования, снижения их металлоемкости ставит перед металлургами задачу расширения сортамента и увеличения объемов производства экономичных фасонных профилей проката отраслевого и специального назначения, т.е. профилей, по геометрической форме максимально приближенных к готовым деталям и изделиям. Применение таких профилей

в машиностроении и других отраслях обеспечивает экономию в среднем до 15 % металла и значительное сокращение трудовых затрат.

В сортаменте металлопроката отраслевого и специального назначения насчитывается более двух тысяч фасонных профилей, различных по форме и размерам поперечного сечения. Ежегодно этот сортament обновляется примерно на 10% благодаря оптимизации формы уже освоенных профилей и освоению производства новых видов. Потребность в каждом отдельном виде специальной металлопродукции сравнительно невелика. Разовые партии поставки такой продукции обычно не превышают вагонной нормы – 60 т. Часто требуются еще меньшие партии – от 1 до 10 т. Поэтому такие профили производятся малотоннажными партиями, но функциональная нагрузка, приходящаяся на эти профили, неизмеримо весомее их доли в массе изделий.

Освоение производства новых экономичных фасонных профилей на металлургических предприятиях весьма затруднительно и требует значительных материальных затрат. Задача разработки технологии прокатки сортовых профилей тем труднее, чем сложнее их геометрия. Исследования по разработке, изучению и рационализации калибровок валков для прокатки подобных профилей разрознены, носят частный характер и практически неприменимы для расчета калибровки новых профилей сложной конфигурации из-за невозможности точного определения формоизменения металла в сложных фасонных калибрах и энергосиловых параметров прокатки. В результате увеличивается число опытных прокаток, расход металла, валков, энергоносителей, рабочего времени и др.

## **2. Постановка проблемы**

Проблема расширения сортамента и производства новых экономичных профилей может быть кардинально решена при условии дальнейшего развития теоретических и экспериментальных исследований прокатки в калибрах сложной формы и разработки на их базе научно обоснованных методов автоматизированного проектирования калибровок прокатных валков и технологических процессов сортовой прокатки, создания базовых технологий и специализированных металлургических мини-заводов для производства экономичных фасонных профилей. Поэтому развитие научных основ создания базовых технологий для производства экономичных фасонных профилей проката является особо актуальной задачей, и ее решение имеет важное народнохозяйственное значение.

Для решения этой задачи требуются всесторонние научные исследования процессов прокатки в сложных фасонных калибрах, в том числе: теоретическое решение трехмерных задач пластического течения металла; разработка математических моделей определения интегральных характеристик формоизменения и энергосиловых параметров прокатки; экспериментальная проверка адекватности разработанных моделей с определением влияния различных технологических факторов на формоизменение металла; разработка научно обоснованных методов расчета калибровок валков и рациональных деформационных, температурно-скоростных и энергосиловых параметров прокатки; создание систем автоматизированного проектирования технологии сортовой прокатки; разработка новых способов прокатки и калибровки профилей, учитывающих специфику их малотоннажного производства, а также совершенствование действующих и разработка новых технологических процессов и оборудования для производства этой высокотехнологичной продукции.

С учетом сложности и многоаспектности решаемой проблемы в институте выработан единый методологический и системный подход к теоретическому и экспериментальному исследованию процессов прокатки в фасонных калибрах.

Ввиду многообразия форм поперечных сечений сложных фасонных профилей проблема их производства в целом может быть успешно решена только при представлении профилей и формующих их калибров как совокупности отдельных типовых базовых (опорных) элементов [1]. На этой основе могут быть созданы максимально унифицированные математические модели определения интегральных характеристик формоизменения (уширения, приращения, утяжки и др.), энергосиловых параметров прокатки (усилий, моментов, мощности и др.) и научно обоснованных методов расчета калибровок валков.

С использованием системного подхода была разработана классификация и выделено пять базовых элементов калибров с различными граничными условиями на боковых кромках: полосовой-клиновой, угловой, пластовый тавровый, ребровой тавровый и крестообразный, в которых формируется большинство фасонных профилей с развитой поверхностью. Далее этот подход был применен к теоретическим и экспериментальным исследованиям течения металла в сложных калибрах и разработке научно обоснованных методов расчета формоизменения, калибровок валков и энергосиловых параметров прокатки; а также к компьютерному моделированию технологического процесса.

Рассмотрим базовые элементы.

*Полосовой-клиновой элемент.* Фасонные полосовые профили могут состоять из одного или двух клиновых элементов, состыкованных толстыми или тонкими боковыми кромками. Клиновой элемент легко преобразуется в обыкновенную полосу. Калибровка специальных полосовых профилей с плоским или клиновидным полотном, на котором имеются выступы или выемки, не представляет особой сложности. Если выступы и впадины занимают небольшую часть полотна, то уширение металла рассчитывают достаточно просто, как и при прокатке обыкновенных полос, а сами выступы и выемки формируют конструктивно. В противном случае уширение необходимо определять по приведенным обжатиям. Для расчета уширения при прокатке клиновых профилей также имеются надежные методы.

*Угловой элемент* образован фланцем и стенкой. К фасонным профилям с одним или двумя угловыми элементами относятся несимметричные полособульбовые профили, автободы, угловые, зетовые, низкорыльные, швеллерные и др. Угловые элементы могут быть расположены под любым углом к горизонтали. Например, если профиль состоит из одного углового элемента, угол наклона фланца и стенки равен  $45^\circ$ , а толщина и ширина фланца и стенки одинаковы, то профиль представляет собой обыкновенный уголок с симметричными полками.

*Пластовый тавровый элемент* состоит из горизонтально расположенной стенки, закрытого и открытого фланцев. К фасонным профилям с одним или двумя тавровыми элементами относятся симметричные полособульбовые и высокотавровые профили, которые прокатываются в калибрах с горизонтальной стенкой, а также двутавровые, рельсовые и другие профили. Например, рельсовый профиль может быть образован двумя состыкованными по стенкам тавровыми элементами. Закрытые и открытые фланцы одного таврового элемента формируют головку рельса, а другого – подошву.

*Ребровой тавровой элемент* состоит из горизонтально расположенных полок и вертикального гребня. К фасонным профилям с одним, двумя или большим числом ребровых тавровых элементов относятся полосотавровые и низкотавровые профили, а также высокотавровые, которые прокатываются с использованием ребровых тавровых калибров.

*Крестообразный элемент* входит только в состав крестообразных профилей, которых в сортаменте профилей отраслевого и специального назначения очень мало. Методика расчета параметров формоизменения металла в крестообразных калибрах подробно описана в работе [2].

Таким образом, наибольшая потребность имеется в исследовании процесса прокатки в трех основных базовых элементах фасонных калибров – угловом и двух тавровых (пластовом и ребровом).

Характер деформации металла в базовых элементах калибров может быть различным в зависимости от формы профиля и определяется в основном геометрическими параметрами очага деформации и граничными условиями на концах элементов (на свободных поверхностях полок или стенки и в местах состыковки элементов). Основная трудность калибровки заключается в расчете положений свободных поверхностей, определяемых уширением стенки и полок в угловых и пластовых тавровых элементах калибров, а также приращением (или утяжкой) фланцев и гребней в пластовых и ребровых тавровых элементах.

Для разработки математических моделей расчета формоизменения и энергосиловых параметров прокатки сложных фасонных профилей с помощью вариационных методов механики сплошных сред было проведено теоретическое исследование пластического течения металла в угловых, пластовых тавровых и ребровых тавровых элементах калибров с постоянной толщиной стенки и полок. Построено кинематически возможное поле скоростей перемещений металла, определены скорости деформаций и интенсивность скоростей деформаций. В поля скоростей введены два варьируемых параметра – коэффициент вытяжки и коэффициент, характеризующий положение поверхности раздела течения металла в поперечном направлении при свободном уширении стенки или полок. Варьируемые параметры определяются из условия минимума полной мощности прокатки. Математические модели позволяют рассчитывать в каждом элементе интегральные характеристики формоизменения металла – высотную деформацию открытых фланцев и гребней, свободное уширение стенок или полок, усилия, моменты и мощность прокатки. Расчет всех параметров выполняется с использованием среды MathCAD [3,4].

Учитывая, что в сортаменте фасонных профилей отраслевого и специального назначения имеется много фланцевых и гребневых профилей с переменной толщиной стенки или полок была разработана обобщенная методика расчета формоизменения и энергосиловых параметров прокатки в фасонных калибрах сложной формы.

В соответствии с этой методикой параметры прокатки сложного профиля определяются комплексно с учетом разнообразия сочетаемых элементов с постоянной и переменной толщиной стенок и полок. Сложная форма фасонных калибров приводится к более простой, состоящей из трех рассмотренных выше базовых элементов – углового, пластового таврового и ребрового таврового. Методика базируется на положении, что неравномерность обжатия по ширине стенок и полок не влияет на высотную деформацию фланцев и гребней.

По этой методике формоизменение и энергосиловые параметры прокатки в фасонных калибрах с переменной толщиной стенки или полок рассчитывают по средней их толщине, приведенной к единой ширине:

$$h_{np} = \frac{F}{B}, \quad (1)$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения стенки или полок, мм<sup>2</sup>;

$B$  – ширина стенки или полок действительного и базового калибров, мм.

Рассмотрим варианты приведения действительной формы калибра к базовой и особенности расчета.

**Вариант 1.** Фасонный калибр имеет один угловой, пластовый тавровый или ребровой тавровый элемент со свободным уширением металла по стенке (полкам) или с ограничением этого уширения, причем стенки (полки) имеют переменную толщину. Приведение действительной формы таких калибров к базовой показано на рис. 1. Во всех случаях ширину  $B$  ба-

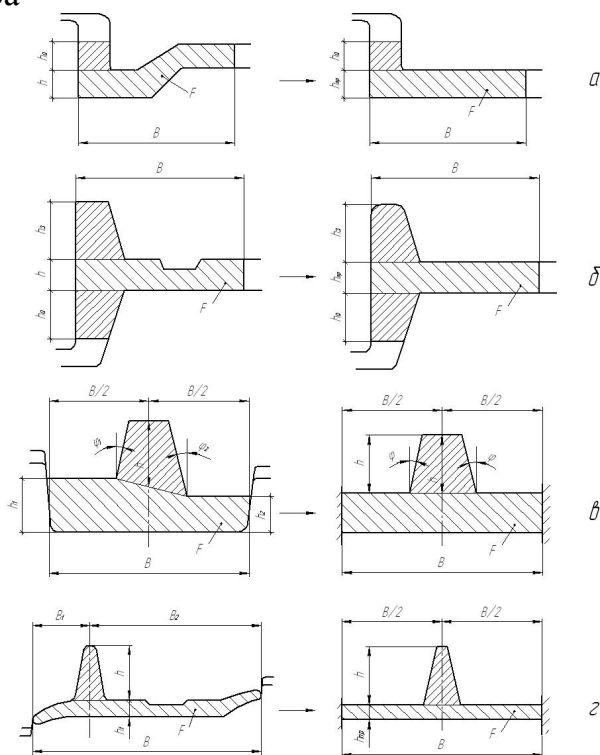


Рис. 1. Действительные (слева) и базовые (справа) калибры, состоящие из одного элемента: углового (а); пластового (б) и ребрового (в, г) таврового

зового калибра принимают равной ширине действительного, а приведенную высоту  $h_{np}$  стенок или полок рассчитывают по формуле (1). Размеры открытых и закрытых фланцев в базовом и действительном калибрах остаются одинаковыми (рис. 1,а,б). Если в действительном калибре, представляющем собой ребровой тавровый элемент, гребень асимметричен, то в базовом калибре его необходимо привести к симметричному виду, сохраняя среднюю высоту  $h$  и принимая  $\varphi = 0,5(\varphi_1 + \varphi_2)$  (рис. 1,в). При асимметричном расположении гребня по ширине  $B$  для приведении действительного калибра к базовому необходимо расположить гребень так, чтобы ребровой тавровый элемент был симметричен относительно вертикальной оси (рис. 1,г).

*Вариант 2.* Фасонный калибр состоит из нескольких состыкованных в различных сочетаниях базовых элементов.

Например, чистовой калибр для прокатки профиля боковины рештаков скребковых конвейеров приводится к базовому калибру, состоящему из двух состыкованных угловых элементов (рис. 2). Высота и толщина открытых фланцев в базовом калибре та же, что и в действительном, а ширина стенки в каждом угловом элементе принимается равной  $0,5B$ . Приведенная высота  $h_{пр}$  стенок или полок рассчитывается по формуле (1).

Чистовой калибр для прокатки специального профиля для направляющих транспортеров приводится к базовому калибру, имеющему три базовых элемента – угловой, ребровой тавровый и пластовый тавровый (рис. 3). В таких калибрах место раздела участка стенки между соседними базовыми элементами располагается на середине его ширины  $l_1 = 0,5l_1 + 0,5l_1$  и  $l_2 = 0,5l_2 + 0,5l_2$ .

Поскольку толщина  $h$  по ширине действительного калибра постоянна, то в базовом калибре  $h_{пр}=h$ .

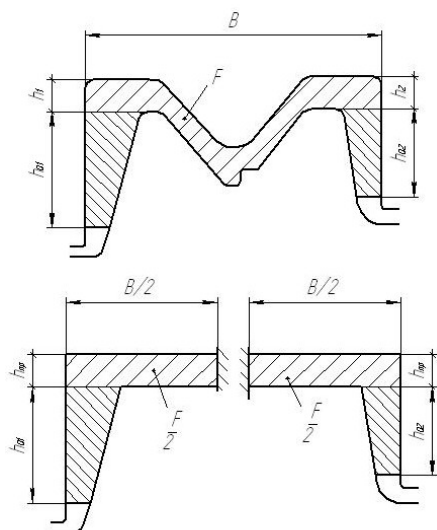


Рис. 2. Действительный калибр и базовый, состоящий из двух угловых элементов

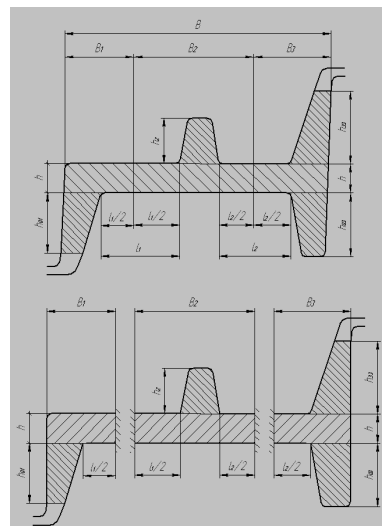


Рис. 3. Действительный калибр и базовый, состоящий из углового, ребрового таврового и пластового таврового элементов

Отдельные элементы базовых калибров на рис. 2 и 3 показаны отдельно для наглядности.

После приведения действительной формы калибра к базовой с использованием разработанных математических моделей производится расчет высотной деформации открытых фланцев и гребней, свободного уширения стенок или полок, усилий, моментов и мощности прокатки по каждому базовому элементу отдельно. При этом учитываются граничные условия на его концах.

Усилие, момент и мощность прокатки в калибре определяются как сумма их значений в каждом базовом элементе:

$$P = \sum_1^n P_n ; \quad M = \sum_1^n M_n ; \quad N = \sum_1^n N_n , \quad (2)$$

где  $n$  – число базовых элементов в данном калибре.

Адекватность разработанных математических моделей реальным процессам прокатки проверяли, сравнивая результаты теоретических расчетов с экспериментальными данными. Сходимость результатов удовлетворительная.

Таким образом, разработанную на основе единого системного подхода обобщенную методику расчета формоизменения и энергосиловых параметров прокатки рекомендуется использовать при проектировании калибровок валков и создании базовых технологий производства экономичных фасонных профилей проката.

**Список литературы:** 1. Медведев В.С. Системный подход к вопросу автоматизированного проектирования калибровок валков для прокатки сложных фасонных профилей [Текст] / В.С. Медведев // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2008. – № 3. – С. 41–46. 2. Тарновский И. Я. Элементы теории прокатки сложных профилей [Текст] / Тарновский И. Я., Скороходов А.Н., Илюкович Б.М.; – М. : *Металлургия*, 1972. – 352 с. 3. Медведев В.С. Методика определения формоизменения и энергосиловых параметров прокатки в фасонных калибрах с использованием вариационных принципов [Текст] / В.С. Медведев // *Вісник Національного технічного університету “ХПІ”*: зб. наук. пр. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2009. – № 8. – С. 41–47. 4. Медведев В.С. Математическое моделирование прокатки в фасонных калибрах в среде MathCAD [Текст] / В.С. Медведев, А.Н. Масленный // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Харьков : ХАИ, 2009. – № 2 (59). – С. 32–35.

**УДК 621.771.01**

**МАКСИМЕНКО О.П.**, докт. техн. наук, проф., ДГТУ, г. Днепродзержинск  
**РОМАНЮК Р.Я.**, аспирант, ДГТУ, г. Днепродзержинск

## **МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРОДОЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ**

В статті, на основі визначення середньої результуючої горизонтальних зовнішніх сил, розроблена методика сталості процесу прокатки. Використовуючи цю методику, можна оцінити сталість процесу в більш широких межах, ніж за допомогою кута нейтрального перетину.

Ключові слова: Епюра, контактні напруження, сила, рівновага, сталий процес, осередок деформації, закон тертя, контактено-гідродинамічна модель.

In paper, on the basis of definition of an average resultant of horizontal external forces, the technique of stability of process rolling rinks is developed. Using this technique, it is possible to estimate stability of process in wider limits, than by means of a corner of neutral section.

Key words: The epure, contact pressures, force, equilibrium, resistant to process, a strain byte, the friction law, an contact-hydrodynamic sample piece.

В статье, на основе определения средней результирующей горизонтальных внешних сил, разработана методика устойчивости процесса прокатки. Используя эту методику, можно оценить устойчивость

процесса в более широких пределах, чем с помощью угла нейтрального сечения.

Ключевые слова: Эпюра, контактные напряжения, сила, равновесие, устойчивый процесс, очаг деформации, закон трения, контактено-гидродинамическая модель.

### **1. Введение**

В теории принято, что угол нейтрального сечения является регулятором равновесия сил в очаге деформации, и при нулевом его значении наступают предельные условия прокатки. Вместе с тем, известны опытные данные устойчивого процесса при однозонном скольжении металла в валках и даже при отставании на выходе из них, что трудно объяснить с позиции существующей теории. Кроме того, эксперименты А.П. Грудева [1], В.И. Прокофьева [2] и других исследователей показывают, что процесс прокатки может прерываться при наличии опережения. Эти результаты также не получили убедительного объяснения.

### **2. Постановка задачи**

Целью работы является анализ всех сил, действующих в очаге деформации, и на основе этого, разработка методики оценки устойчивости процесса в продольном направлении.

### **3. Порядок исследования**

Рассмотрим силы, действующие в зоне контакта полосы с валками. Исходными данными для их анализа принимаем эпюры распределения контактных напряжений по длине очага деформации.

Для примера обратимся к данным теоретического исследования нормальных давлений и удельных сил трения [3].

При прокатке в условиях, когда радиус валков  $R = 300$  мм, начальная толщина полосы  $h_0 = 0,3$  мм, угол захвата  $\alpha_y = 0,017$  рад и коэффициент трения  $f = 0,044$ , эпюры контактных напряжений имеют вид, показанный на рис. 1, а, б.

На графике (рис. 1, в) приведено распределение внешнего горизонтального напряжения в каждом сечении очага деформации, определяемого по формуле:

$$\frac{q_x}{2k} = -\frac{p_x}{2k} \sin \varphi + \frac{t_x}{2k} \cos \varphi, \quad (1)$$

где  $\varphi$  – текущий угол в очаге деформации,

$2k$  – сопротивление деформации.

Ниже на рис. 1, г показана кривая изменения текущей результирующей горизонтальных сил  $Q_x^*$  в безразмерной форме:

$$Q_x^* = \int_{\varphi}^{\alpha} \frac{q_x}{2k} d\varphi. \quad (2)$$

Как видно, данная сила на границах контактной зоны равна нулю. Отсюда следует, что скорости полосы на входе и выходе из валков остаются постоянными во времени. Следовательно, процесс прокатки является стационарным.

Вместе с тем, внутри очага деформации текущая сила  $Q_x^*$  изменяется по определённому закону и очевидно можно найти её среднее значение  $Q_{cp}^*$ .

Эта горизонтальная результирующая, являющаяся внешней силой, и подвергается анализу в наших исследованиях.

Для решения вопроса о том, какие силы её уравнивают, проанализируем распределение продольных нормальных напряжений, возникающих в пластически деформируемом металле  $\frac{\sigma_x}{2k}$ . Учитывая уравнение пластичности, нетрудно построить график изменения этих напряжений (рис. 2, а), найти текущее по очагу деформации значение горизонтальных внутренних сил  $Q_{x\text{вн}}^*$  (рис. 2, б):

$$Q_{x\text{вн}}^* = \frac{\sigma_x}{2k} h_x = \left( \frac{p_x}{2k} - 1 \right) \left( \frac{h_1}{R} + \varphi^2 \right), \quad (3)$$

и получить среднюю величину горизонтальных внутренних сил  $Q_{ср\text{вн}}^*$ .

Сравнивая среднее значение внешних и внутренних сил, приходим к выводу, что:

$$2Q_{ср}^* = Q_{ср\text{вн}}^*, \quad (4)$$

т.е. они взаимно уравновешены, чем и обеспечивается стационарность процесса.

Очевидно, что при данном угле нейтрального сечения  $\gamma$  втягивающие силы затрачиваются не только на преодоление выталкивающих, но и на уравнивание силы  $Q_{ср\text{вн}}^*$ . В этом можно убедиться, если сравнить значения  $\gamma$ , полученные непосредственно из решения дифференциального уравнения Кармана по эпюрам распределения удельных сил трения и по известной формуле:

$$\gamma = \frac{\alpha_y}{2} \left( 1 - \frac{\alpha_y}{2f_y} \right), \quad (5)$$

при одинаковых условиях прокатки.

Результаты вычислений приведены в таблице 1.

Анализ полученных данных показывает, что угол  $\gamma$ , определяемый из эпюр всегда меньше, чем по приведенной формуле. Последнее связано с тем, что при решении уравнения Кармана внутренние силы деформируемого металла в равновесии участвуют, а при расчёте по формуле И.М. Павлова нет.

Таблица 1

| №<br>п/п | Толщина<br>полосы,<br>мм |       | Угол<br>захвата,<br>$\alpha$ , рад | Радиус<br>валков,<br>$R$ , мм | $\frac{l_d}{h_{cp}}$ | Коэф.<br>трения,<br>$f$ | Угол $\gamma$ , рад |                          | Относ.<br>разница, % |
|----------|--------------------------|-------|------------------------------------|-------------------------------|----------------------|-------------------------|---------------------|--------------------------|----------------------|
|          | $h_0$                    | $h_1$ |                                    |                               |                      |                         | по<br>эпюрам        | по<br>формуле<br>Павлова |                      |
| 1        | 0,3                      | 0,21  | 0,017                              | 300                           | 20                   | 0,044                   | 0,006               | 0,0069                   | 13,4                 |
| 2        | 0,6                      | 0,42  | 0,024                              | 300                           | 14                   | 0,056                   | 0,0072              | 0,0094                   | 23,4                 |
| 3        | 9                        | 6,6   | 0,2                                | 60                            | 1,54                 | 0,15                    | 0,033               | 0,037                    | 10,8                 |
| 4        | 9                        | 6,6   | 0,2                                | 60                            | 1,54                 | 0,2                     | 0,05                | 0,055                    | 9,1                  |
| 5        | 5                        | 4,45  | 0,129                              | 93                            | 2,54                 | 0,152                   | 0,026               | 0,037                    | 29,7                 |
| 6        | 1,0                      | 0,64  | 0,06                               | 100                           | 7,3                  | 0,06                    | 0,0078              | 0,0087                   | 11,5                 |

Заметим, что безразмерная средняя результирующая горизонтальных сил  $Q_{cp}^*$  тесно связана с кинематическими параметрами прокатки и, в частности, с опережением металла, что видно из графиков на рис. 3. Теоретический расчёт опережения проводился по известной формуле Головина-Дрездена. При определении силы  $Q_{cp}^*$  исходили из вышеприведенной методики. Опытные значения опережения и условия прокатки взяты из работы [1]: диаметр валков  $D = 194,6$  мм, конечная толщина образцов  $h_1 = 1,1$  мм, коэффициент трения  $f_y = 0,25$ .

Как следует из рис. 3, б зависимость опережения и силы  $Q_{cp}^*$  от угла захвата  $\alpha_y$  является качественно одинаковой. Опытные и расчётные значения опережения весьма близки. Важно подчеркнуть, что, как утверждает автор [1], при угле захвата  $\alpha_y = 0,34$  рад наступают предельные условия прокатки, хотя опережение составляет 10,1 %. Из графика (рис. 3, б) видно, что при этом безразмерная результирующая сила  $Q_{cp}^*$  равна нулю.

Для получения эпюр контактных напряжений использовали решение дифференциального уравнения Кармана при модели трения [4,5].

На рис. 4 приведены эпюры изменения текущей результирующей силы в условиях, близких к предельным.

В первом случае, при угле захвата  $\alpha_y = 0,33$  рад, положительная площадь под кривой  $Q_x^*$  больше отрицательной, следовательно сила  $Q_{cp}^*$  положительна, направлена в сторону движения полосы и способствует устойчивому процессу прокатки. Во втором ( $\alpha_y = 0,35$  рад) – эти площади равны,  $Q_{cp}^* \approx 0$ , следовательно, наступают предельные условия. И в последнем случае, при  $\alpha_y = 0,36$  – преобладает

отрицательная площадь, средняя результирующая сила меньше нуля, поэтому устойчивый процесс деформации невозможен.

Аналогично проанализируем данные [2], представленные на рис. 5, а. Для условий опытной прокатки: диаметр валков  $D = 210$  мм, конечная толщина образцов  $h_1 = 3,75$  мм, коэффициент трения  $f_y = 0,28$ , приведены обобщённые результаты исследования (рис. 5, б).

Автор отмечает, что при угле захвата  $\alpha_y = 0,4$  рад и опережении  $S = 4\%$  возникает пробуксовка металла в валках.

Заметим, что в этом случае также сила  $Q_{cp}^* \approx 0$ .

В литературе имеются опытные данные, например Т. Мидзуно [6], И.М. Павлова и В.К. Белосевича [7], а также других, в которых наблюдается устойчивый процесс прокатки при “отрицательном” опережении с применением эффективных технологических смазок.

На основе вышеизложенной методики с применением контактно-гидродинамической модели трения при решении дифференциального уравнения Кармана, построим модель процесса прокатки для условий: диаметр валков  $D = 200$  мм, конечная толщина образцов  $h_1 = 0,64$  мм, угол захвата  $\alpha = 0,06$  рад. Обобщенные результаты приведены на рис. 6.

Как следует из графика изменения силы  $Q_{cp}^*$ , процесс прокатки может протекать при положительном, нулевом опережении, и даже при отставании скорости полосы на выходе из валков. И только при опережении  $S = -4,7\%$  наступают предельные условия деформации, т.к. средняя результирующая сила принимает нулевое значение.

Приведённые графики убеждают в том, что средняя результирующая горизонтальных сил  $Q_{cp}^*$  отражает реальную устойчивость процесса прокатки по условиям захвата, и сигнализирует о возможности пробуксовки металла в очаге деформации.

Таким образом, учитывая, что при простом устойчивом процессе средняя результирующая горизонтальных внешних сил в очаге деформации не равна нулю, то общая равнодействующая внешних сил будет наклонена в сторону движения полосы.

#### 4. Выводы

При анализе эпюр контактных напряжений можно выделить среднюю результирующую горизонтальных сил в очаге деформации. В зависимости от условий прокатки она может принимать разные значения.

Показано, что предельные условия деформации наступают при равенстве данной силы нулю. Во всех остальных случаях, при устойчивой прокатке, она направлена в сторону движения металла.

Таким образом, общая результирующая всех сил наклонена в сторону процесса деформации, а не направлена вертикально, как это принято в теории. Очевидно, что в этом случае изменится плечо приложения данной силы, что является дальнейшей задачей исследований в этом направлении.

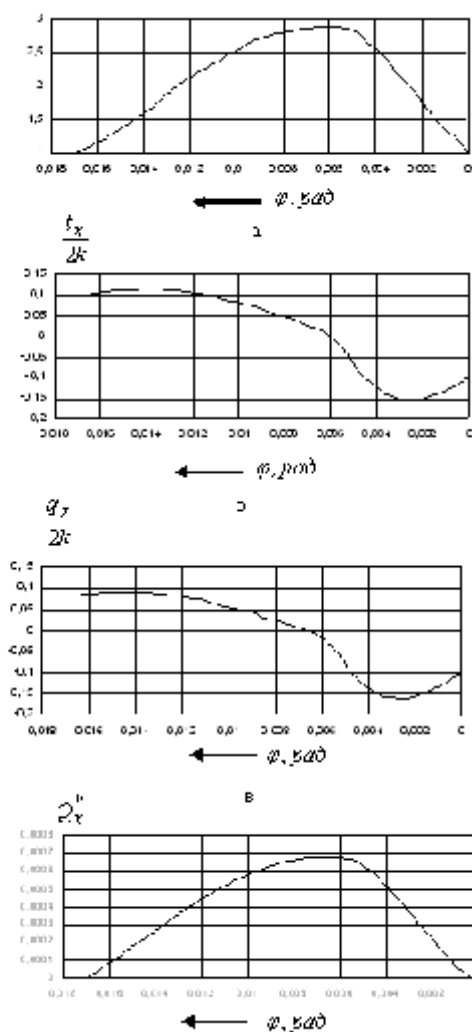


Рисунок 1 – Эпюры распределения контактных напряжений, продольного внешнего напряжения и текущей результирующей горизонтальных внешних сил

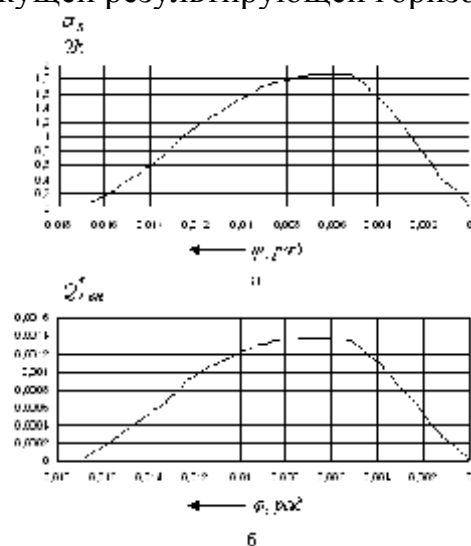


Рисунок 2 – Эпюры распределения внутреннего напряжения и текущей результирующей горизонтальных внутренних сил  
а – практические данные А.П. Грудева; б – результаты теоретического исследования;

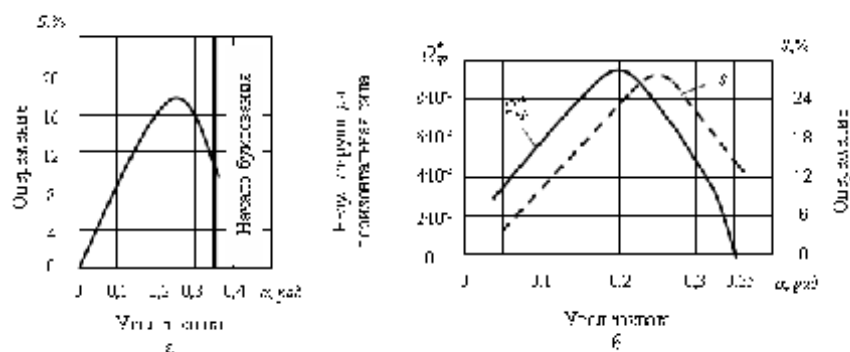


Рисунок 3 – Зависимость опережения и силы  $Q_{cp}^*$  от угла захвата

1 –  $\alpha = 0,33$  рад; 2 –  $\alpha = 0,35$  рад; 3 –  $\alpha = 0,36$  рад;

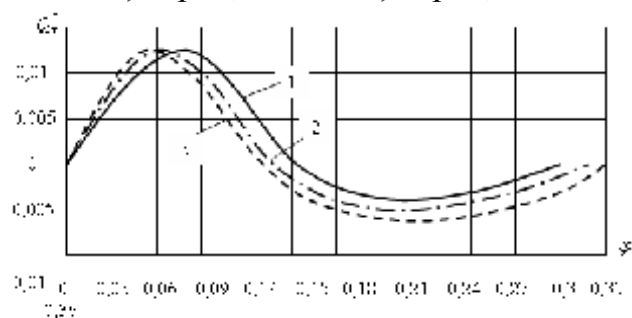


Рисунок 4 – Эпюры распределения силы  $Q_{cp}^*$  по длине очага деформации  
а – практические данные В.И. Прокофьева; б – результаты теоретического исследования;

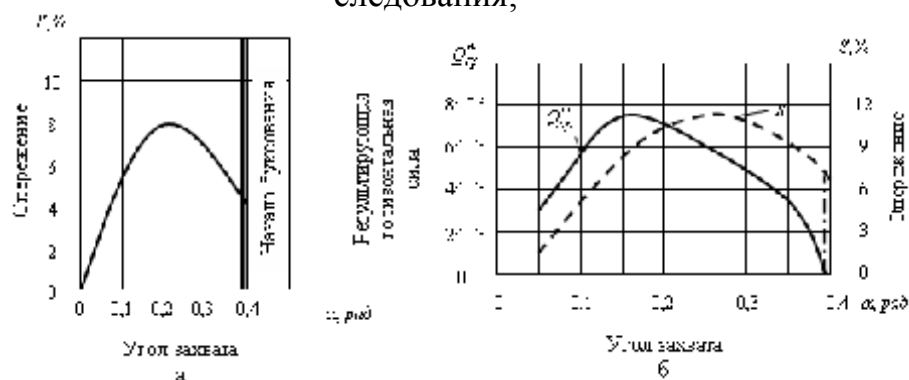


Рисунок 5 – Зависимость опережения и силы  $Q_{cp}^*$  от угла захвата

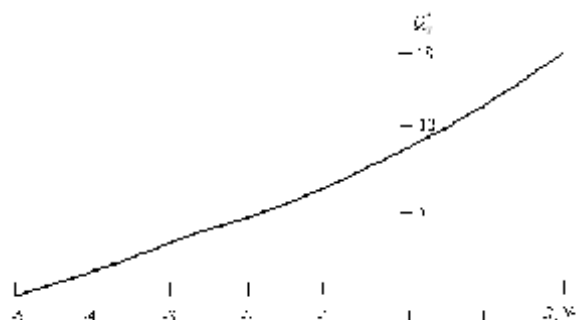


Рисунок 6 – Зависимость силы  $Q_{cp}^*$  от опережения при исследовании с использованием контактно-гидродинамической модели трения

**Список литературы:** 1. Грудев А.П. Захватывающая способность прокатных валков. М.: "СП Интермет Инжиниринг", 1998. – 283 с. 2. Гончаров Ю.В., Прокофьев В.И. Исследование экспериментальных методов определения коэффициента внешнего трения при прокатке // Обработка металлов давлением: Науч. тр. ДМетИ. – Вып. XLIX: – М.: Металлургия, 1965. – С.238-254. 3. Василев Я.Д. Развитие теории контактных напряжений при прокатке / Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Том 5. Пластична деформація металів. Дніпропетровськ: Системні технології, 2002. – С.86-96. 4. Максименко О. П. Влияние режима трения на устойчивость прокатки при однозонном скольжении металла в валках / О. П. Максименко, Р. Я. Романюк, А. А. Никулин // Изв. вуз. Чёрная металлургия. 2008, № 6. – С.26-29. 5. Максименко О. П. Теоретический анализ захватывающей способности валков в установившемся режиме прокатки / О. П. Максименко, А.А. Никулин, Р. Я. Романюк // Изв. вуз. Чёрная металлургия. 2008, № 10. – С.32-34. 6. Такадзи Мидзуно. Экспериментальное исследование холодной прокатки / Сосей-то како. Том 7. 1966, № 66. – С.363-389. 7. Павлов И. М. К вопросу об отрицательном опережении при прокатке / И. М. Павлов, В. К. Белосевич // Изв. вуз. Чёрная металлургия. 1961, № 10. – С.46-49.

**УДК 621. 771. 057**

**СЕРЕДА Б.П.**, докт. техн. наук, проф., ЗГИА, г. Запорожье  
**КОВАЛЕНКО А.К.**, аспирант, ЗГИА, г. Запорожье

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НА БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛОСЫ ПРИ ПРОКАТКЕ В КАЛИБРАХ**

Рассмотрен процесс прокатки в калибрах. Предложена математическая модель напряженно-деформированного состояния на боковой поверхности полосы. Найдено оптимальное соотношение параметров калибра, позволяющие рационально использовать энергетические и материальные ресурсы, а также получать прокат без брака.

Ключевые слова: оптимизация, калибр, полоса, деформация.

Розглянуто процес прокатування в калібрах. Запропоновано математична модель напружено-деформованого стану на бічній поверхні штаби. Знайдено оптимальне співвідношення параметрів калібру, що дозволяють раціонально використовувати енергетичні й матеріальні ресурси, а також одержувати прокат без браку.

Ключові слова: оптимізація, калібр, штаба, деформація.

A process proskating rink in calibres is considered. The mathematical model of the is intense-deformed condition on a lateral surface of a strip is offered. The optimum parity of parameters of the caliber is found, allowing rationally to use power and material resources, and also to receive hire without marriage.

Key words: an optimisation, a caliber, a strip, a deformation.

### **1. Введение**

В условиях постоянной борьбы за рынки сбыта продукция украинских производителей по соотношению цены и качества нередко проигрывает своим китайским и русским аналогам, поэтому наиболее остро стоит вопрос комплексного решения таких задач, как обеспечение роста производительности станов, повышение качества поверхности и макроструктуры проката.

Нередко эти требования производства находятся между собой в противоречиях и поэтому необходима оптимизация технологии прокатки. Важной задачей явл-

яется сокращение поверхностных и внутренних дефектов крупных слитков при прокатке на обжимных станах. Известно, что прокатка в системе ящичных калибров во многом определяют качество заготовки [1].

## 2. Постановка проблемы

В качестве критерия эффективности режимов прокатки широко применяется показатель степени использования запаса пластичности. Однако его определение в условиях реального процесса осложняется значительной неравномерностью деформаций и температур, поэтому предложенная математическая модель базируется на феноменологических представлениях критерия пластичности в постановке В.Л. Колмогорова [2], который в качестве такого критерия предложил величину  $\Lambda$  – степень деформации сдвига ( $d\Lambda = Hdt$ , где  $H$  – интенсивность деформации сдвига).

Для исследования напряженно-деформированного состояния проведено моделирование процесса прокатки в лабораторных условиях. Определены такие факторы оптимизации, как четыре безразмерных параметра, которыми характеризуется очаг деформации (рис. 1) при прокатке в калибрах ( $x_1 = D^*/H_1$  – приведенный диаметр валков;  $x_2 = H_0/H_1$  – коэффициент обжатия;  $x_3 = H_0/B_0$  – исходное отношение осей полосы;  $x_4 = (B_k - B_d)/H_1$  – выпуска калибра) и относительная координата точек на боковой поверхности раската ( $x_5 = z'/h$ ). Степень защемления полосы в калибре была принята равной единице ( $a_3 = B_0/B_d = 1$ ).

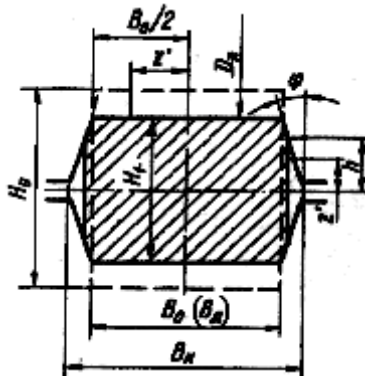


Рис. 1. Очаг деформации при прокатке в ящичном калибре

Уровни и интервалы варьирования выбраны в соответствии с реальным диапазоном изменения их в существующих калибровках рабочих валков (табл. 1).

Таблица 1

Факторы и количественные оценки их уровней

| $x_1$     |     |      | $x_2$     |      |      | $x_3$     |     |   | $x_4$             |     |     | $x_5$  |   |   |
|-----------|-----|------|-----------|------|------|-----------|-----|---|-------------------|-----|-----|--------|---|---|
| $D^*/H_1$ |     |      | $H_0/H_1$ |      |      | $H_0/B_0$ |     |   | $(B_k - B_d)/H_1$ |     |     | $z'/h$ |   |   |
| -1        | 0   | 1    | -1        | 0    | 1    | -1        | 0   | 1 | -1                | 0   | 1   | -1     | 0 | 1 |
| 4,5       | 8,5 | 12,5 | 1,22      | 1,35 | 1,48 | 1         | 1,5 | 2 | 0,2               | 0,3 | 0,4 | -1     | 0 | 1 |

С целью определения влияния выбранных факторов на напряженно деформированное состояние на боковой поверхности полосы был использован симметричный некомпозиционный план второго порядка для пяти факторов предложенный Боксом и Бенкеном (табл. 2). В соответствии с которым по выборке из плана  $3^5$  было проведено 46 опытов, шесть из которых на нулевом уровне.

Таблица 2

# Матрица пятифакторного симметричного некомпозиционного плана второго порядка

| $x_1$   | $x_2$   | $x_3$   | $x_4$   | $x_5$   |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| $\pm 1$ | $\pm 1$ | 0       | 0       | 0       |
| 0       | 0       | $\pm 1$ | $\pm 1$ | 0       |
| 0       | $\pm 1$ | 0       | 0       | $\pm 1$ |
| $\pm 1$ | 0       | $\pm 1$ | 0       | 0       |
| 0       | 0       | 0       | $\pm 1$ | $\pm 1$ |
| 0       | $\pm 1$ | $\pm 1$ | 0       | 0       |
| $\pm 1$ | 0       | 0       | $\pm 1$ | 0       |
| 0       | 0       | $\pm 1$ | 0       | $\pm 1$ |
| $\pm 1$ | 0       | 0       | 0       | $\pm 1$ |
| 0       | $\pm 1$ | 0       | $\pm 1$ | 0       |
| 0       | 0       | 0       | 0       | 0       |

Образцы изготовляли из свинца, на все грани наносили координатную сетку с размером ячейки 2мм. После прокатки на лабораторных станах диаметром валков 120 и 280 мм получали недокаты. Координаты узлов сетки замеряли на инструментальном микроскопе. Обработка результатов экспериментального исследования проведена по методике множественного корреляционно-регрессионного анализа, изложенной в работах [3,4]. Для степени деформации сдвига на боковой поверхности полосы получено с уравнение регрессии (1) и построены поверхности отклика (рис. 2).

$$\Lambda = -0,815 - 0,014 \frac{D_*}{H_1} + 1,359 \frac{H_0}{H_1} - 0,066 \frac{H_0}{B_0} + 0,014 \frac{D_*}{H_1} \left(\frac{z'}{h}\right)^2 + 0,244 \frac{H_0}{H_1} \left(\frac{z'}{h}\right)^2 - (1) \\ - 0,089 \frac{H_0}{B_0} \left(\frac{z'}{h}\right)^2 - 0,013 \left(\frac{z'}{h}\right)^2$$

Для приведенной формулы коэффициент корреляции составил  $R = 0,91$ , среднее квадратическое отклонение  $S = 0,81$ .

Как видно наибольшее влияние на степень деформации сдвига оказывает степень обжатия, а наибольшие значения ее достигаются на участках поверхности, которые прилегают к боковому контакту (выпуску калибра).

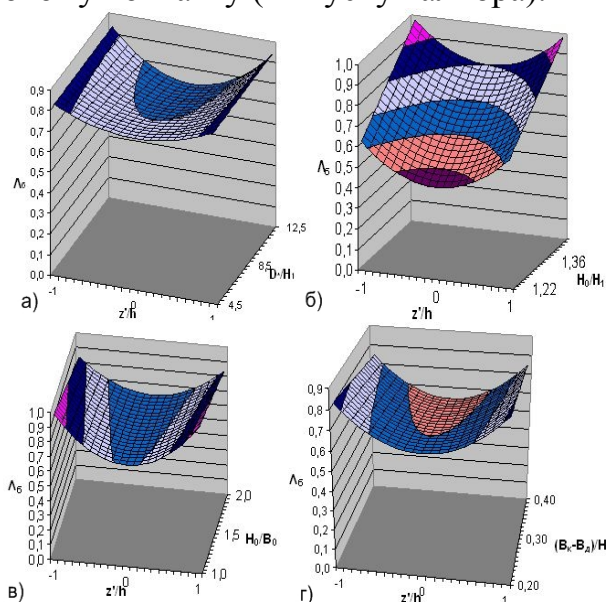


Рис. 2. Распределение  $\Lambda$  на поверхности полосы: а – при  $H_0/H_1 = 1,35$ ;  $H_0/B_0 = 2$ ;  $(B_k - B_d)/H_1 = 0,2$ ; б – при  $D^*/H_1 = 12,5$ ;  $H_0/B_0 = 2$ ;  $(B_k - B_d)/H_1 = 0,2$ ; в – при  $D^*/H_1 = 12,5$ ;  $H_0/H_1 = 1,35$ ;  $(B_k - B_d)/H_1 = 0,2$ ; г – при  $D^*/H_1 = 12,5$ ;  $H_0/H_1 = 1,35$ ;  $H_0/B_0 = 2$

Результаты расчета показывают, что данная методика позволяет прогнозировать степень деформации сдвига и может быть использована для проектирования калибровок валков и выбора рациональных режимов обжатий на блюминге [5].

**Список литературы:** 1. Колмогоров, В.Л. Пластичность и разрушение / В.Л. Колмогоров, А.А. Богатов, Б.А. Мигачев. – М.: Металлургия, 1977. – 366 с. 2. Колмогоров, В.Л. Напряжения. Деформация. Разрушение / В.Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1970. – 230 с. 3. Воронцов, В.К. Об экспериментальном исследовании степени деформации сдвига по высоте раската / В.К. Воронцов, Р.Э. Гафаров, В.В. Лашин. – М: Изв. вуз. Черная металлургия, 1983, №6, с. 59 –62. 4. Новик, Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов. – М.: Машиностроение, 1980. – 304 с. 5. Серета, Б.П. Розробка оптимальних режимів прокатки та після деформаційної обробки прутків зі спеціальної сталі діаметром більше 270 мм / Б.П. Серета, О.М. Тумко, І.В. Кругляк, А.К. Коваленко / зб. наук. праць «Металургія» №19. – Запоріжжя, 2009. – с. 109 – 114.

**УДК 669.012.3**

**СТАСОВСКИЙ Ю.Н.**, докт. техн. наук, проф., НМетАУ, г. Днепропетровск  
**ЧУХЛЕБ В.Л.**, канд. техн. наук, доц., НМетАУ, г. Днепропетровск

## **РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ: СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ**

Рассмотрены проблемы ресурсосбережения в процессах обработки металлов давлением (ОМД) в Украине с современных позиций развития мирового человечества в условиях его стабильности. Показаны перспективные пути повышения энергоэффективности за счет реализации принципов индустриального симбиоза, рециркуляции, комплексности. Рассмотрена современная концепция энергетичности, малоотходности. Важное место занимают вопросы оптимизации процессов ОМД по энергетическим показателям.

Ключевые слова: ресурсосбережение, процессы обработки металлов давлением, энергоэффективность, оптимизация

Розглянуто проблеми ресурсозбереження в процесах обробки металів тиском (ОМТ) в Україні з сучасних позицій розвитку світового людства в умовах його стабільності. Показані перспективні шляхи підвищення енергоефективності за рахунок реалізації принципів індустріального симбіозу, рециркуляції, комплексності. Розглянуто сучасну концепцію енергетичності, малоєідходності. Важливе місце посідають питання оптимізації процесів ОМТ за енергетичними показниками.

Ключові слова: ресурсозбереження, процеси обробки металів тиском, енергоефективність, оптимізація

The resource savings problems are considered during the plastic deformation processes in Ukraine by modern positions of development of the world community on conditions of stability. Perspective ways of power efficiency increase are shown due to realisation of principles: industrial symbiosis, integrated approach. The important place is allocated to the questions of optimization of the plastic deformation processes on power parameters.

Key words: resource savings, the plastic deformation processes, power efficiency, optimization

**Введение.** Обработка металлов давлением (ОМД) является основным способом получения готовой металлопродукции и полуфабрикатов. Свыше 90% металла, который выплавляют, перерабатывается разными видами ОМД. Металлургия, в

частности процессы ОМД, во всех странах считаются одними из главных потребителей энергии и ресурсов. Потребляется около 30% всей энергии, которая потребляется промышленностью, а по отношению к потреблению всем хозяйством доля металлургии в зависимости от ее структуры составляет 9-14%. Для технических целей ежегодно в ГМК Украины расходуется около 45 млн. тонн условного топлива (у. т.), в том числе около 10 млрд. м<sup>3</sup> природного газа. Эта энергия расходуется на: выплавку чугуна и цветных металлов, сталеплавильный передел, горячую и холодную обработку металлов давлением, термическую обработку. Отрасль в Украине экспортноориентирована. При экспорте 1 млн. тонн проката из страны за рубеж вывозится около 1,5 млн. тонн у. т., в том числе 330 млн. м<sup>3</sup> природного газа, который существенно сказывается как на конкурентоспособности продукции, так и на энергетическом балансе всего хозяйственного комплекса Украины. По данным Мирового банка энергоэффективность экономики Украины (производство ВВП на единицу потребленной энергии) ниже соответствующего показателя Польши - в 2,5 раза, Китая и США - в 3 раза, Японии - в 4,5 раз. Решение вопроса повышения энергоэффективности предприятий ГМК Украины в последнее время является особенно актуальным. Известно, что энергоемкость продукции (наравне с качеством) определяет её конкурентоспособность.

**Постановка проблемы.** Технологическое отставание металлургии в Украине от ведущих стран мира заключается в следующем:

- свыше 60 процентов продукции вырабатывается по старым технологиям и на оборудовании, которое требует модернизации или замены;
- значительными являются затраты на энергоресурсы, которые составляют свыше 40 процентов себестоимости металлургической продукции;
- большие затраты на потребленные энергоресурсы повышают себестоимость продукции ГМК и существенным образом снижают ее конкурентоспособность.

По энергоемкости на металлургических заводах производство проката на 2-м месте - почти 150кг у. т./т проката (1-е место: доменное производство - 600-700кг у. т./т чугуна; 3-е место: мартеновское производство - 120кг у. т./т стали). Доля природного газа в расходах топлива составляет при производстве проката до 45% (при производстве чугуна - до 18%; при мартеновском производстве стали до 78%). Удельный расход энергии в процессах металлургической плавки за последние годы при неизменной доле руды и металлома сократились, а удельный расход электроэнергии на процессы горячей и холодной обработки металлов давлением увеличились.

Это связано с увеличением рабочих скоростей и повышением уровня механизации и автоматизации процессов, в том числе вспомогательных, причем потребление возросло в большей мере, чем увеличение производства металлургической продукции.

В черной металлургии прокатное, трубное и кузнечно-штамповочное производство завершает стадию переработки металла и является *основным потребителем* энергетических ресурсов: *газа* (природного, доменного) и *электроэнергии*.

**Анализ исследований.** Этим объясняется повышенное внимание к проблеме снижения энергозатрат в ГМК при рассмотрении планов развития отрасли, которые стали в особенности актуальными в последнее время из-за повышения стоимости природного газа.

Двумя программами в Украине регулируются вопросы ресурсосбережения:

1) «Комплексная государственная программа энергосбережения Украины» (1996г.). Потенциал энергосбережения ГМК Украины оценивается более чем в 1/3 тепловых энергоресурсов, которые расходуются, причем реальный уровень их экономии на период до 2011г. определяется в 20-25%;

2) «Государственная программа развития и реформирования ГМК Украины до 2011 года». Предполагается снижение удельных затрат топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) ориентировочно на 300кг у. т. на 1 тонну проката, что составляет около 20% от их потребления.

В развитых странах эту проблему решают комплексно. Наиболее эффективным принципом энергосбережения (получает широкое распространение в последние годы) есть *принцип индустриального симбиоза*- объединения вроде как несовместимых объектов, а именно: материальных и энергетических потоков в единый энерго-технологический поток. При этом симбиозе появляется возможность реализовать знаменитый *принцип рециркуляции*: если не добиваться полного использования исходного сырья или энергии, а обеспечивать наиболее экономически выгодные режимы переработки при экономически оптимальной конверсии (обычно 20-30%), выделяя после этого готовый продукт (вещество или энергию) и возвращая неиспользованные ресурсы на начало процесса.

Одним из наиболее эффективных принципов является *комплексность* при решении задач уменьшения энергопотребления промышленными установками. Под этим имеется в виду не только применение энергосберегающих технологий, не только применение оснащения для локальной утилизации энергетических выбросов, а, в первую очередь - решение комплексной задачи по созданию энергетической техники как единство технологии и оборудования.

Концепция обеспечения *энергетической малоотходности* сводится к стремлению не бороться с отходами путем их переработки или даже рециркуляции, а вести процесс так, чтобы они получались в минимальном количестве.

Основным критерием *оптимизации* процессов ОМД по энергетическим показателям является снижение затрат энергии, в первую очередь, оптимизация температурного режима и оптимизация режима обжата. Энергию можно и нужно экономить в первую очередь во время нагрева сортовых и листовых слитков (блужков, слябов). Снижение температуры выдачи при прокатке и температуры окончанияковки и штамповки обеспечивает более значительную экономию энергии, чем потери от повышения затрат электроэнергии при деформации более холодного металла. Важным аспектом является минимизация размеров исходной заготовки, максимально приближая её размеры к размерам готовой продукции. Поскольку только около 50% энергии, которую потребляет электродвигатель, может быть использован в качестве энергии деформации, а вторая половина расходуется на покрытие потерь, число проходов нужно сокращать к технологически приемлемому минимуму. К оптимизации режимов обжата относится выбор приемлемого обжата за проход и назначение кантовок между проходами.

**Неисследованное.** В настоящее время, несмотря на накопленный мировой опыт по производству металлопродукции методами ОМД, усилия разработчиков многих фирм и предприятий направлены на создание новых ресурсосберегающих и совершенствование существующих технологий и оборудования по критериям «ресурсосбережение» и «энергосбережение» для производства конкурентоспособной продукции.

Выявление наиболее перспективных и эффективных направлений экономии энергоносителей, оценка эффективности внедрения энергосберегающих технических и технологических мероприятий, определение имеющейся энергоемкости конечной продукции каждого предприятия, сравнение энергоемкости однотипной продукции (разных производителей - эти задачи всегда представляли большой интерес, но (приобрели особую актуальность после резкого подорожания одного из наиболее распространенных видов топлива - природного газа. В качестве единой методической основы может быть принята *сквозная энергоемкость*, которая базируется на основе существующей статистической отчетности.

**Цель.** (Постановка задачи). На решение существующих в Украине проблем ресурсосбережения в процессах ОМД направлены исследования, результаты некоторых из них приведены в данной статье. Целью проводимых исследований являлось определение приоритетных направлений дальнейшего развития производств ОМД, выбор наиболее оптимального пути решения существующих проблем и повышения конкурентоспособности отечественных производств металлопродукции с применением процессов ОМД.

**Результаты исследований.** В процессах ОМД (прокатном, трубном и кузнечно-штамповочном производствах) имеет место полезное потребление тепла и его потери по всей технологической цепочке. Расход энергии в нагревательных и термических печах состоит из *полезного тепла* и его потерь. При прокатке полупродукта из слитков имеют место затраты энергии, которые: на стадии *разливки* сортовых и листовых слитков зависят в первую очередь от способа выплавки стали; на стадии *подготовки и нагрева* исходного металла.

В настоящее время на металлургических предприятиях Украины в прокатном производстве эксплуатируются: 11 блюмингов и слябингов, 6 заготовочных станов, 1 трубозаготовочный стан, 3 рельсобалочных стана, 5 крупносортовых и 12 среднесортовых станов, 13 мелкосортовых и проволочных станов, 6 толстолистовых станов горячей прокатки, 2 непрерывных тонколистовых стана горячей прокатки, 2 цеха холодной прокатки (непрерывные, одноклетьевые станы, 20-ти валковый стан, станы для прокатки жести; оборудование для выпуска: оцинкованного листового проката, гнутых профилей, проката из нержавеющей марки стали).

В прокатном производстве технологический процесс производства продукции из слитков состоит из двух стадий: прокатка слитка в полупродукт (заготовку) и прокатка полупродукта в готовый прокат.

На данный момент в мировой практике большое распространение приобрело производство полупродукта (заготовки) методом непрерывной разливки стали на машинах непрерывной разливки заготовки (МНЛЗ), которое позволяет исключить из технологической схемы большие и мощные обжимные станы - блюминги, слябинги и заготовочные станы.

К основным технологическим операциям при производстве листового и сортового проката относятся: подготовка металла к прокатке, нагрев металла, собственно прокатка, охлаждение и отделка проката.

Использование природного газа в ГМК Украины в общих затратах энергоресурсов составляет: доменное производство - 18%, мартеновское производство стали - 78%, прокатное производство - 45%, МНЛЗ - 0,5%, производство сортового проката - 15%, производство горячекатаного листа - 9,5%, производство холоднокатаного листа - 3,5%.

Трубная промышленность Украины объединяет производственную базу 14 специализированных предприятий. Большая часть из них (12 предприятий), преобразованы в акционерные общества различного типа и 2 государственные, а также отраслевой институт ГП «НИТИ». Производственная база этих предприятий состоит из 40 специализированных трубных цехов, в которых трудится около 48 тысяч трудящихся, обеспечивающих возможность изготовления около 10 тысяч типоразмеров труб общего и специального назначения способами горячего, холодного и теплового деформирования, а также электросварных и центробежнолитых труб.

В этих цехах расположены и эксплуатируются 13 агрегатов для производства горячедеформированных труб, в том числе: 4 - трубопрокатных агрегатов (ТПА) с пилигримовыми станами, 4 - ТПА с автоматическими станами, 1 - ТПА с трехвалковым станом, 2 - ТПА с непрерывными станами, 2 - трубопрессовые установки.

Некоторые предприятия располагают 8 цехами и специализированными участками для производства холоднодеформированных труб, которые оснащены десятками станов холодной прокатки труб валкового (ХПТ) и роликового (ХПТР) типов, а также волочильными станами и необходимым вспомогательным технологическим оборудованием.

Мощности по производству сварных труб представлены на семи специализированных предприятиях в количестве трубоэлектросварочных агрегатов (ТЭСА), которые позволяют производить сварные трубы малых, средних и больших диаметров (от 10 до 1420 мм).

К концу 1998г. объем производства труб в Украине сократился более чем в 5 раз (мощность около 7 млн.т). В настоящее время установочная мощность специализированных трубных заводов Украины составляет более 5,0 млн. тонн труб в год, фактически в последние годы производится труб в Украине около 1,5-2,0 млн. тонн труб в год. Некоторые мощности введены еще в 1935 году, основные мощности вводились в 60-е и 80-е годы прошлого столетия. Их износ составляет от 63 до 95%. Мощности загружены практически только на 33%.

В мировой трубной промышленности (МТП) наметились устойчивые тенденции, которые определяют стратегический вектор ее развития. Одной из них является то, что современная МТП изготавливает уже не трубы, а изделия, используемые потребителями с минимальной последующей обработкой. Определяющие тенденции эволюции структуры производства в современных условиях определяются двумя группами критериев: количественными (уровень и темпы роста производства) и качественные (расходные коэффициенты материалов и энергии, производительность труда).

В начале этого века в МТП происходят процессы коренной модернизации и реконструкции с учетом критерия «ресурсосбережение» и «энергосбережение». Анализ показал, что сейчас примерно 97% общего количества стальных горячекатаных труб производятся на трубопрокатных агрегатах (ТПА) четырех видов: около 40% на ТПА с автоматическим станом или станом тандем; более 22% - на ТПА с непрерывным оправочным станом; более 18% - ТПА с пилигримовым станом; более 10% - ТПА с трехвалковым станом.

Трубы, выпускаемые в Украине, существенно уступают зарубежным аналогам по коррозионностойкости. Сейчас от уровня оснащенности предприятия современными средствами неразрушающего контроля труб во многом зависит, как потребитель будет оценивать его как возможного поставщика. В конечном итоге внедрение

системы позволяет обеспечить увеличение выпуска качественной продукции и снижение ее себестоимости. Независимо от способа производства горячедеформированных труб, технологическая схема включает следующие общие элементы: нагрев металла, получение полой заготовки (гильзы) и черновой трубы (раскатка гильзы), окончательное формирование стенки и диаметра трубы (редуцирование или калибрование). При этом перед каждой технологической операцией при необходимости проводят подогрев трубы. Расходы по переделу на всех ТПА составляют 15-40% от себестоимости продукции, а 60-85% приходится на стоимость металла, расходный коэффициент металла (р.к.м.) наибольший на ТПА с пилигримовым (обрезь, пилигримовая головка) и трехвалковым станами (значительная концевая обрезь и необходимость обточки трубы). Кроме того, ТПА с пилигримовым и трехвалковым станами при наименьшей доле вспомогательного времени в такте прокатки имеют продолжительные неустановившиеся стадии процесса раскатки. Расчеты показывают, что снижение р.к.м. позволяет значительно повысить эффективность производства, причем при одинаковом снижении р.к.м. эффективность повышается в наибольшей степени при снижении отходов металла на отделочных операциях. Следовательно, необходимо тщательно подготавливать заготовку с повышением р.к.м. при условии соответствующего снижения р.к.м. на последующих операциях; необходимо расширять «узкие места» на раскатке путем совершенствования процессов раскатки гильзы в трубу.

Украинским производителям горячекатаных труб трудно удерживать свои позиции на мировом рынке. Практически все владельцы активов украинских предприятий–производителей горячекатаных труб задекларировали свои намерения о проведении коренной реконструкции и модернизации действующих предприятий, но все эти мероприятия сильно растянуты во времени и практически не предусматривают привлечение разработок отечественных ученых и машиностроителей. Схема остается прежней: привлечение заемных иностранных финансовых ресурсов, ориентация на зарубежных специалистов и закупка импортного оборудования.

На данном этапе развития производства труб сортаментной группы, относящейся к техническим возможностям ТПА с пилигримовыми станами можно отметить две тенденции, а точнее предложенные две альтернативные концепции. Первая, заключается в современных подходах к модернизации действующих ТПА с пилигримовыми станами, предусматривающей разработку современных конструкций подающих аппаратов, которая исключает существующие недостатки. Вторая концепция предусматривает ликвидацию ТПА с пилигримовыми станами и заменой их на современные непрерывные станы. Концерн SMS (ФРГ) и фирма «Danieli» (Италия) каждый в отдельности предложили новую конструкцию непрерывного стана для горячей прокатки труб широкого сортамента (соответственно PQM и FQM), который «перекрывает» сортамент ТПА с пилигримовым станом. По многих представленных этими фирмами технико-экономическим показателям новый стан превосходит существующие пилигримовые станы.

Результаты исследований показали, что каждая технология эффективна в определенных границах сортамента труб, которые значительно уже технически возможных границ.

В кузнечно-штамповочном производстве совершенствование процессовковки идет за счет снижения металлоемкости процесса (снижения припусков и

допусков), более экономного раскроя слитков, применения более рациональных приемовковки, частичной и комплексной механизации и автоматизации.

В настоящее время имеется положительный опыт разработки систем управления технологическим процессом свободнойковки, который включает автоматизацию комплекса «пресс-манипулятор», обеспечивающую увеличение производительности до 50%; разработку автоматизированных систем управления участком прессы свободнойковки, что является вполне реальной задачей и обеспечит, по ориентировочным данным, увеличение производительности на 200-250%.

В отличие отковки штамповка имеет меньшую трудоемкость и себестоимость изготовления деталей, которые обусловлены тем, что штамповка относится к серийному производству.

Расход металла существенно зависит от особенностей технологии производства поковок и группы их сложности. Наибольшая экономия металла достигается по группе поковок, штампуемых осадкой в торец (8-15%). Экономия металла по группе поковок с длинной осью составляет 6-10%. Наименьшая экономия металла (до 2 %) получается при штамповке поковок сложной конфигурации с небольшой высотой.

Прогрессивным технологическим процессом получения горячих штамповок является штамповка шестерен с зубьями. Зубчатые колеса полученные таким способом, имеют благоприятное расположение волокон, могут передавать большие усилия и выдерживать более высокие статические нагрузки на зубья по сравнению с шестернями, изготовленные из того же материала резанием. Кроме указанных преимуществ, этот метод изготовления шестерен обеспечивает экономию металла до 30-60%.

Технологический процесс малоотходной штамповки с противодавлением или компенсаторами заключается в получении поковок без облоя в закрытых штампах с компенсацией избытка металла, который неизбежен при существующих способах резки заготовок, в специальные полости штампа. При малоотходной штамповке экономится до 10-20% металла и повышается производительность. Этот метод применяется для изготовления цилиндрических и конических шестерен.

Дальнейшее совершенствование технологии штамповки на прессах обеспечивает дополнительную экономию металла. Благодаря применению прессов снижается трудоемкость штамповки поковок и обеспечивается рост производительности труда. Производительность труда при штамповке на прессах увеличивается в среднем на 20-30% по сравнению с молотовой штамповкой. Себестоимость штамповки на прессах всегда ниже себестоимости штамповки на молотах. В среднем себестоимость снижается на 5-7%.

Определение области эффективного применения различных видов кузнечно-штамповочного оборудования и технологических процессов способствует правильному использованию прогрессивной техники и обеспечит достижение наиболее высоких экономических показателей при производстве поковок и деталей машин.

Отсутствие четких рекомендаций, характеризующих условия эффективного использования современной техники кузнечно-штамповочного производства, приводит к неправильному использованию высокопроизводительного и дорогостоящего кузнечного и нагревательного оборудования. От метода производства зависит точность изготовления поковки, т.е. степень приближения формы и размера поковки к форме и раз-

меру готовой детали, а следовательно, вес поковки и детали, трудоемкость ее производства и себестоимость.

В качестве наглядного положительного примера для владельцев металлургических предприятий Украины можно привести процесс перехода на новую модель развития экономики Японии на примере черной металлургии, где важнейшие направления технического обновления были связаны с ресурсосбережением и нацелены прежде всего на повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов. В Японии на долю черной металлургии приходится до 15% энергопотребления всего хозяйства (в США, например, всего 4,5%). За счет различных технологических и организационных мероприятий в Японии удалось за 1970 - 1990гг. сократить удельные энергозатраты на 1 т стали более чем на треть.

***Ресурсосбережение включало широкий спектр комплексных мероприятий - от отдельных технических усовершенствований (например, вдувание пылеугольной пыли в доменную печь или использование вторичного тепла отходящих газов) до крупных структурно-инвестиционных маневров отраслевого масштаба (внедрение непрерывного литья, электродуговой плавки или внепечной обработки стали).***

В прокатном переделе широко практикуется применение различных вариантов использования тепла непрерывнолитых заготовок. При использовании «горячего посада» удельный расход энергии снижается на 30%, а при использовании прямой прокатки (без подогрева) - почти на 80%. Так к началу 90-х годов на заводах полного цикла удельный вес прямой прокатки в производстве горячего проката составил около 15%, а прокатки с «горячего посада» - более 60%. Благодаря широкому внедрению непрерывного литья заготовок (около 98% в настоящее время) расход стали на 1 т проката в Японии составляет 1030 - 1040кг, что примерно на 25% меньше, чем в США и странах Западной Европы.

Наиболее рациональной схемой интегрированного предприятия на сегодня является комплексное использование металлургических агрегатов по технологической цепочке („доменная печь — кислородный конвертор" или „электropечь ~ внепечная обработка стали - непрерывная разливка - прокатный стан или иной агрегат ОМД "). Эта технологическая схема характеризуется наименьшим уровнем энергозатрат - около 1 т у. т. / т стали. Сегодня этот показатель в Украине находится в среднем на уровне 1,7 - 2,0 т у. т. / т стали.

**Выводы.** Проведен комплексный многофакторный анализ существующего состояния производств ОМД в Украине, выявлены острые проблемы и предложены научно обоснованные концептуальные подходы, базирующиеся на мировом опыте, по ресурсосбережению в процессах ОМД, применительно к реальным условиям ГМК Украины. Для решения этих задач необходимо иметь стратегию развития каждого предприятия и отрасли в целом, неразрывно связанную с основными направлениями энерго- и ресурсосбережения.

**Перспектива.** Разработчики ведущих зарубежных фирм идут по пути дальнейшего повышения качества и снижения затратной части при производстве металлопродукции в процессах ОМД за счет разработки и внедрения ресурсосберегающих технологий и оборудования.

Снижение *энергоёмкости* производства металлопродукции должно выполняться на основе разработки и внедрения энергосберегающих технологических процессов.

Такая оценка полностью корреспондируется с опытом энергосбережения передовых металлургических предприятий стран ЕС, где за счет использования вторичных энергоресурсов сокращается почти половина общей потребности в энергоресурсах. Основная часть экономии энергоресурсов при модернизации производства может быть достигнута за счет вывода из эксплуатации обжимных цехов и устаревших агрегатов ОМД.

К основным современным энергосберегающим технологиям в сортопрокатном производстве следует отнести: прокатка сортового проката из непрерывно-литой заготовки (НЛЗ), объединение непрерывной разливки с прокаткой, оптимизация сечения и массы исходной заготовки, температурных и деформационно-скоростных режимов прокатки, низкотемпературная прокатка, контролируемая прокатка, термическая обработка проката с использованием тепла прокатного нагрева, создание мини-производств для переработки отходов.

Основные мероприятия по повышению уровня утилизации вторичных энергоресурсов (ВЭР): реконструкция нагревательных печей прокатных станов в энерготехнологические агрегаты, которые объединяют процесс нагрева металла с глубокой утилизацией тепла продуктов сгорания; утилизация тепла дымовых газов нагревательных колодцев для изготовления электроэнергии; утилизация тепла заготовок и рулонов; уменьшение расхода воды на охлаждение теплонагруженного оборудования и проката.

Общий ожидаемый эффект от использования ВЭР на металлургических предприятиях Украины составляет около 120-150кг у. т./т проката, который разрешит на 10% уменьшить расход топлива. Использование ВЭР может обеспечить до 50% потребности предприятий в электроэнергии.

**Список литературы:** 1. Проектирование современных производств обработки металлов давлением/ Ю. Н. Стасовский, Ю.С. Кривченко, Г.С. Бабенко; под ред. д.т.н. Ю. Н. Стасовского. - Днепропетровск: МОНОЛИТ, 2009.- 746 с.: ил. 2. Стасовский Ю.Н. Энергосбережение при горячей прокатке труб / Металл бюллетень Украина, 2008, № 4 (118), С. 78-85. 3. Стасовский Ю.Н. Мировая трубная промышленность. XXI век / Экономика Украины, 2008.- №5; №6.- С. 51-58. 4. Оптимизация расхода энергии в процессах деформации // Хензель А., Шпиттель Т., Шпиттель М. и др. / Под ред. Т. Шпиттеля и А. Хензеля: пер. с нем., М.: Металлургия, 1985.- 184 с. 5. Литвиненко В.Г., Ботштейн В.А., Андреева Т.А. и др. Влияние технологических параметров производства на энергоёмкость проката / Экология.-Донецк.- 2006.- №5.- С. 15-23. 6. Буторина И.В., Харлашин П.С, Сущенко А.В. Пути снижения энергоёмкости металлургических процессов на предприятиях Украины // Сталь. - 2003.-№ 7.- С. 97-100. 7. Методика нормирования сквозных заводских удельных расходов топливно-энергетических ресурсов для предприятий горно-металлургического комплекса // Методика /Министерство промышленной политики - Киев, 1998. - 20 с. 8. Грецькая Г.Н., Андреева Т.А., Литвиненко В.Г. Сквозная энергоёмкость продукции: методы расчета и анализа // Металлург. - 2002. — № И, — С. 32-35. 9. В.С. Бялковская, Г.А. Брянский Технические и экономические основы кузнечного производства. М., Машиностроение, 1972, 272 с. 10. А.П. Атрошенко, В.И. Федоров Металлосберегающие технологии кузнечно-штамповочного производства. – Л., Машиностроение, 1990. – 280 с. 11. А.П. Петров, П.А. Масловский, С.В. Ершов, А.А. Жуков Прогрессивные технологические процессыковки и объемной штамповки.– М., Высшая школа, 1989. – 104 с. 12. Система управления качеством проектирования технологических процессовковки. – М., Машиностроение, 1984. – 184 с. 13. Энергетические аспекты и современное потребление энергоносителей в черной металлургии / К. Хен-

дрикс, Х.М. Айхингер, М. Йокш, Г.П, Домельс // Чёрные металлы.- 1998.- июль-август.- С. 108-118. 14. Задачи по энергосбережению в ГМК Украины и пути их решения / Сталинский Д.В., Ботштейн В.А., Каневский А.М. и др./ Материалы научно-практического семинара Энергосберегающие технологии. Перспективы их внедрения на предприятиях металлургической отрасли», Донецк, 2006. - 56 с. 15. Задорский В.М. Системный подход к решению вопросов экологизации и энергосбережения. / Материалы научно-практического семинара «Энергосберегающие технологии. Перспективы их внедрения на предприятиях металлургической отрасли», Донецк, 2006. - 56 с.

**УДК 621.771.25:51.001.57:539.2.001.18**

**ЖУЧКОВ С. М.**, докт. техн. наук, проф., ИЧМ НАНУ, г. Днепропетровск  
**РАЗДОБРЕЕВ В.Г.**, канд. техн. наук, ИЧМ НАНУ, г. Днепропетровск  
**ПАЛАМАРЬ Д.Г.**, ИЧМ НАНУ, г. Днепропетровск  
**ИВАНОВ А.П.**, ИЧМ НАНУ, г. Днепропетровск  
**ВОРОБЕЙ С.А.**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ИЧМ НАНУ, г. Днепропетровск

### **КОМПЛЕКСНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОТОВОГО ПРОКАТА**

Рассмотрены процессы непрерывной сортовой прокатки и последующего термоупрочнения арматурного проката, произведенного способом многоручьевой прокатки-разделения на пять ниток. Предложена комплексная математическая модель для расчета энергосиловых параметров прокатки и прогнозирования микроструктуры и механических свойств.

Ключевые слова: непрерывная сортовая прокатка, арматурный прокат, микроструктура, механические свойства, математическая модель.

Розглянуто процеси безперервної сортової прокатки та наступного термозміцнення арматурного прокату, виробленого способом багаторівчавкової прокатки-розділення на п'ять ниток. Запропонована комплексна математична модель для розрахунку енергосилових параметрів та прогнозування мікроструктури й механічних властивостей.

Ключові слова: безперервна сортова прокатка, арматурний прокат, мікроструктура, механічні властивості, математична модель.

The processes continuous rolling and subsequent heat treatment reinforcing bars made by a way multisplit of dividing rolling on five of roll are considered. The complex mathematical model for account the force, moment and capacity of parameters rolling both forecasting of microstructure and mechanical properties.

Key words: continuous rolling, reinforcing bar, microstructure, mechanical properties, mathematical model.

В условиях мирового кризиса и жесткой конкуренции для металлургической отрасли весьма актуальными остаются вопросы повышения требований по качеству металлопродукции, получение необходимого структурного состояния и свойств, обеспечивающих высокую технологичность при ее переработке в различных отраслях народного хозяйства страны.

Непрерывные мелкосортные и проволоочные станы являются наиболее современными высокопроизводительными агрегатами, технологический процесс на которых характеризуется строгой поточностью и согласованностью, что в принципе позволяет осуществлять его в узких интервалах изменения параметров. Внедрение в

практику сортопрокатного производства непрерывных станов позволило существенно увеличить единичную производительность агрегатов, однако при этом проявились недостатки этого процесса, связанные с ухудшением структурного состояния и служебных свойств готовой продукции. Например, для основного марочного сортамента при производстве сортовых профилей и катанки температура начала прокатки регламентируется обычно в пределах 1200-1150 °С [1], а температура конца прокатки – 1190-900 °С. Однако для современных непрерывных мелкосортных и проволочных станов характерным являются более высокие температуры конца прокатки 1140-1020 °С, что способствует повышенному окалинообразованию и обезуглероживанию, ухудшает формирование требуемой микроструктуры и в целом комплекса физико-механических свойств готового проката.

В 90-тые годы XX столетия в мировой практике выпуска металлопроката наметилась тенденция уменьшения доли сортового проката в общем объеме его производства. В то же время производство мелкосортного проката и катанки заметно возросло, что потребовало реконструкции старых и сооружения новых агрегатов, производящих эту продукцию [2]. С 1995 г. в мире введено в эксплуатацию 120 новых сортовых станов и кардинально реконструированы более 80 станов [3, 4]. Технологии прокатки на этих станах удалось поднять на более высокий уровень для обеспечения более высоких требований к геометрическим размерам проката и его механическим свойствам. Осуществляется совершенствование температурного режима прокатки и последующей термомеханической обработки проката.

Наиболее массовым видом металлопродукции мелкосортных станов является арматурный прокат для железобетонных конструкций и его производство относится к числу быстро развивающихся сегментов металлургии. За последние 25-30 лет выпуск арматурного проката в мире вырос более чем вдвое и достигает почти 100 млн. т в год, или 10 % общемирового производства проката. Наибольшее распространение получила унифицированная свариваемая арматура класса Ат500С [5, 6]. Выпуск стержневой термомеханически упрочненной арматуры периодического профиля классов Ат500С и Ат400С из углеродистой стали составил в России в 2006 году 3535 тыс. т., а в 2007 году – уже 4000 тыс. т. Согласно прогнозам он должен возрасти к 2010 году до 4,5-5,5 млн. т. и до 5,5-6,0 млн. т. к 2015 году [7].

В то же время наиболее перспективным в связи с развитием строительства мостов, защитных оболочек атомных реакторов и других большепролетных и специальных сооружений из железобетона является промышленное производство высокопрочного термомеханически упрочненного арматурного проката классов Ат800 и Ат1000 [5, 6].

Решить проблему повышения качества проката можно при осуществлении комплекса технических и технологических решений, в том числе и за счет разработки технологических режимов, позволяющих получать прокат с заданными показателями качества. Современный подход к проектированию технологических процессов основывается на разработке математических моделей, использование которых позволяет прослеживать формирование показателей качества по всей технологической линии прокатного стана в широких диапазонах изменения параметров процесса.

В Институте черной металлургии НАН Украины разработано комплексное программное обеспечение (ПО), позволяющее рассчитывать и анализировать температурные, деформационные, скоростные, энергосиловые параметры процесса прокатки и прогнозировать структуру и механические свойства готового проката. На ос-

нове расчета и анализа технологических параметров процесса прокатки и последующего охлаждения появляется возможность оптимизации конструктивно-структурного состава прокатного стана, режимов прокатки и последедеформационной обработки с позиций обеспечения требуемого комплекса показателей качества производимой продукции, а также разрабатывать технологические режимы производства проката из новых марок стали. Алгоритм расчета приведен на рис. 1.

Для оценки возможности производства арматурного проката с обеспечением оптимальной температуры конца прокатки  $1000^{\circ}\text{C}$  в условиях мелкосортного стана 320 БМЗ провели вычислительный эксперимент по определению энергосиловых параметров прокатки при производстве термомеханически упрочненного проката диаметром 10 мм класса прочности Ат-800 из стали марки 25Г2С, получаемой методом прокатки-разделения на пять ниток из заготовок сечением 140x140 мм. Вычислительный эксперимент выполняли с использованием разработанной комплексной математической модели. Согласно заводской технологии скорость прокатки указанного профиля составляет 14 м/с, температура раската на выходе из 2-ой клетки стана составляет  $1050^{\circ}\text{C}$ , температура конца прокатки (на выходе из последней чистовой клетки стана) порядка  $1000^{\circ}\text{C}$ . Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Из анализа табл. 1 видно, что усилие прокатки в 1, 5 и 19 рабочих клетях превышает допустимые их технической характеристикой значения. В то же время значения момента и мощности прокатки находятся в пределах допустимых.

Поэтому для реализации процесса многониточной прокатки-разделения на пять ниток арматурного профиля №10 из заготовки сечением 140x140 мм необходимо либо перераспределение обжатий по клетям стана, либо изменение существующего температурно-скоростного режима прокатки. В табл. 2 представлены результаты расчета энергосиловых параметров процесса прокатки термомеханически упрочненного проката диаметром 10 мм класса прочности Ат-800 из стали марки 25Г2С, получаемой методом прокатки-разделения на пять ниток из заготовок сечением 140x140 мм после изменения режима обжатий в перегруженных клетях стана.

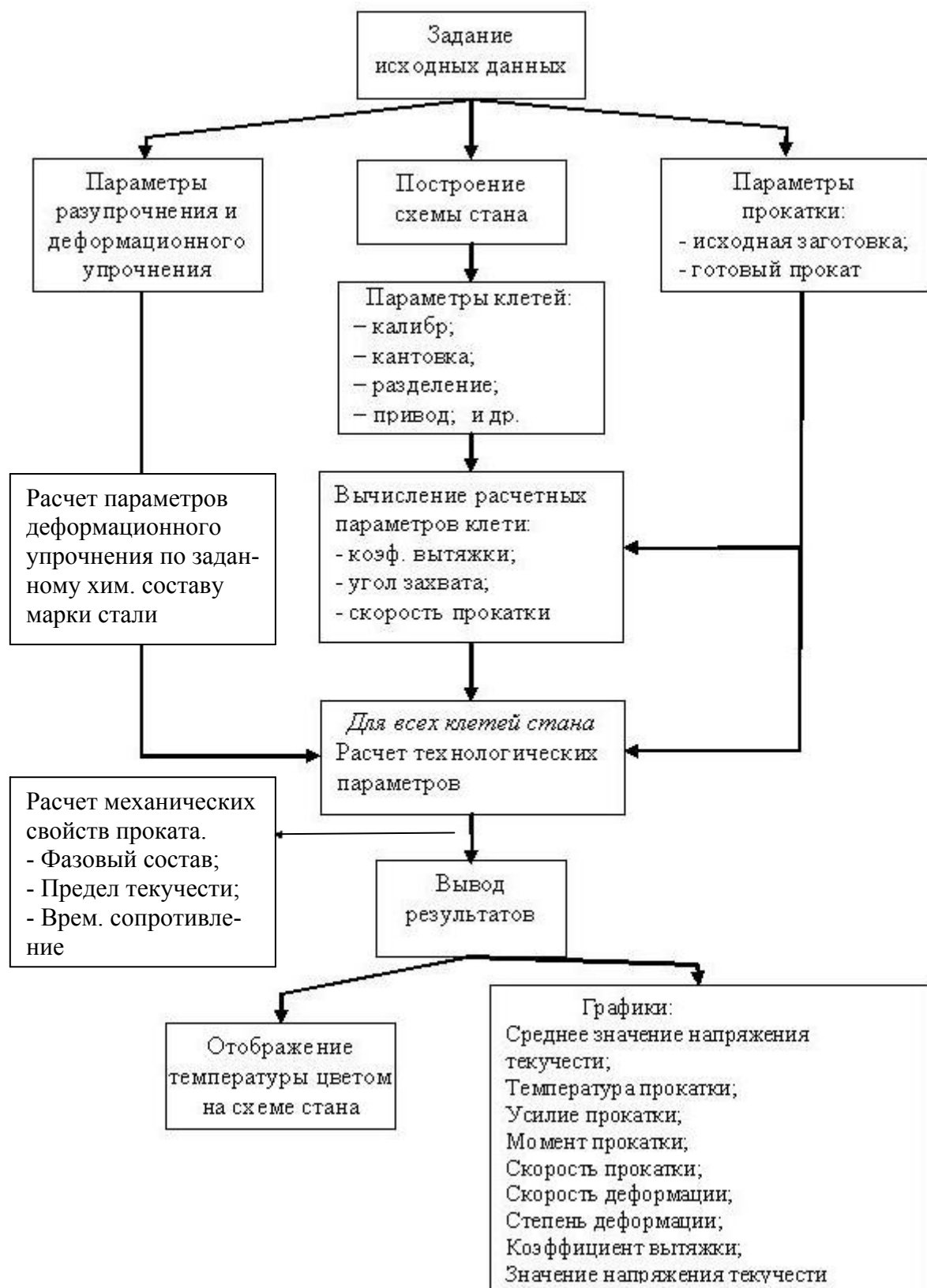


Рис. 1. Описание схемы работы программы расчета технологических параметров при непрерывной прокатке и прогнозирование структуры и механических свойств сортового проката и катанки

Таблица 1

Результаты расчета энергосиловых параметров процесса прокатки термомеханически упрочненного проката диаметром 10 мм класса прочности Ат-800 из стали марки 25Г2С

| № клетки | P, кН  | M, кН*м | N, кВт | P <sub>max</sub> , кН | M <sub>max</sub> , кН*м | N <sub>max</sub> , кВт |
|----------|--------|---------|--------|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| 1        | 1720,2 | 138,8   | 231,86 | 1450                  | 151                     | 540                    |
| 2        | 1140,3 | 88,1    | 198,49 | 1450                  | 151                     | 540                    |
| 3        | 1323,1 | 86,2    | 242,59 | 1450                  | 151                     | 540                    |
| 4        | 906,3  | 66,2    | 249,82 | 1450                  | 151                     | 540                    |
| 5        | 959,1  | 46,7    | 327,28 | 850                   | 72                      | 540                    |
| 6        | 627,9  | 33,9    | 334,04 | 850                   | 72                      | 540                    |
| 7        | 627,7  | 26,1    | 317,35 | 850                   | 72                      | 540                    |
| 8        | 507,6  | 23,5    | 397,61 | 850                   | 72                      | 540                    |
| 11       | 601,9  | 20,5    | 490,09 | 629                   | 37,5                    | 900                    |
| 12       | 384,7  | 9,2     | 283,87 | 629                   | 37,5                    | 900                    |
| 13       | 56,5   | 1,7     | 64,15  | 591                   | 37,5                    | 900                    |
| 14       | 220,4  | 3,9     | 161,97 | 591                   | 37,5                    | 900                    |
| 16       | 189,7  | 2,8     | 140,72 | 478                   | 37,5                    | 900                    |
| 18       | 205,5  | 2,8     | 163,03 | 591                   | 37,5                    | 900                    |
| 19       | 635,4  | 6,4     | 420,65 | 478                   | 37,5                    | 900                    |
| 20       | 172,6  | 3,6     | 304,79 | 591                   | 37,5                    | 900                    |

Из анализа табл. 2 видно, что после изменения режима обжатий в перегруженных клетях и переноса части деформации в другие клетки ограничения были устранены.

Таким образом, изменение режима обжатий позволяет производить указанный арматурный профиль №10 из стали марки 25Г2С оптимального состава, получаемый методом прокатки-разделения на пять ниток из заготовок сечением 140x140 мм с сохранением существующего на стане температурно-скоростного режима прокатки и не требует изменения конструктивно-структурного состава стана.

С использованием разработанного программного комплекса выполнены расчеты прогнозирования структуры и механических свойств арматурного проката диаметром 10 мм из стали марки 25Г2С с целью гарантированного обеспечения требований класса Ат800 ( $\sigma_T \geq 800$  Н/мм<sup>2</sup>,  $\sigma_B \geq 1000$  Н/мм<sup>2</sup>,  $\delta_5 \geq 8$  %).

Результаты расчетов показали, что влияние накопленной степени деформации на механические свойства незначительно. Влияние температуры конца прокатки при обеспечении постоянной температуры самоотпуска также незначительно. В тоже время варьирование температурой конца прокатки при постоянной схеме последовательного охлаждения (параметрах трассы охлаждения) существенно влияет на механические свойства проката посредством влияния температуры самоотпуска (рис. 2).

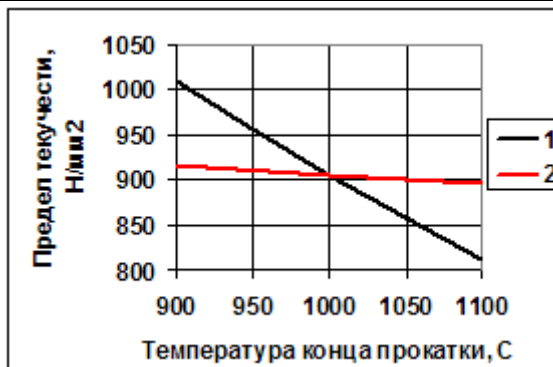
Таблица 2

Результаты расчета энергосиловых параметров процесса прокатки термомеханически упрочненного проката диаметром 10 мм класса прочности Ат-800 из стали марки

| № клетки | P, кН  | M, кН*м | N, кВт | P <sub>max</sub> , кН | M <sub>max</sub> , кН*м | N <sub>max</sub> , кВт |
|----------|--------|---------|--------|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| 1        | 1441,5 | 117,0   | 190,65 | 1450                  | 151                     | 540                    |
| 2        | 943,5  | 64,6    | 145,68 | 1450                  | 151                     | 540                    |
| 3        | 1317,8 | 85,6    | 241,62 | 1450                  | 151                     | 540                    |
| 4        | 911,8  | 66,4    | 251,34 | 1450                  | 151                     | 540                    |
| 5        | 849,8  | 41,6    | 284,74 | 850                   | 72                      | 540                    |
| 6        | 498,4  | 23,5    | 230,00 | 850                   | 72                      | 540                    |
| 7        | 586,9  | 24,7    | 296,70 | 850                   | 72                      | 540                    |
| 8        | 378,3  | 18,2    | 296,34 | 850                   | 72                      | 540                    |
| 11       | 482,3  | 17,3    | 392,73 | 629                   | 37,5                    | 900                    |
| 12       | 349,6  | 8,6     | 257,97 | 629                   | 37,5                    | 900                    |
| 13       | 41,0   | 1,2     | 46,60  | 591                   | 37,5                    | 900                    |
| 14       | 208,0  | 3,7     | 152,83 | 591                   | 37,5                    | 900                    |
| 16       | 177,3  | 2,7     | 131,51 | 478                   | 37,5                    | 900                    |
| 18       | 195,1  | 2,7     | 154,77 | 591                   | 37,5                    | 900                    |
| 19       | 473,6  | 4,1     | 269,97 | 478                   | 37,5                    | 900                    |
| 20       | 118,2  | 2,3     | 188,03 | 591                   | 37,5                    | 900                    |



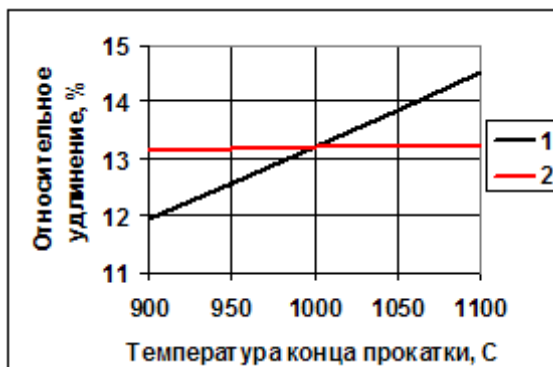
а



б



в



г

Рис. 2. Влияние температуры конца прокатки на температуру самоотпуска (а) и механические свойства арматурного проката диаметром 10 мм из стали марки 25Г2С (б-г): 1 – при постоянной трассе охлаждения; 2 – при постоянной температуре самоотпуска

Из рис. 2 видно, что наиболее оптимальной температурой конца прокатки для осуществления последующей термомеханической обработки проката с целью получения заданного комплекса свойств (оптимального соотношения прочностных и пластических свойств) готового арматурного проката из стали марки 25Г2С является 1000 °С. При этом было спрогнозировано, что в результате последующей термической обработки формируется приблизительно 80 % самоотпущенного мартенсита и приблизительно 20 % бейнита. Результаты расчетов были проверены при проведении прокаток на стане 320 БМЗ (табл. 3 и 4).

Таблица 3

Химический состав плавов стали марки 25Г2С

| №<br>п/п | Содержание химических элементов, % |      |      |       |       |       |      |      |
|----------|------------------------------------|------|------|-------|-------|-------|------|------|
|          | C                                  | Mn   | Si   | P     | S     | Cr    | Ni   | Cu   |
| 1        | 0,251                              | 1,31 | 0,71 | 0,022 | 0,022 | 0,065 | 0,11 | 0,23 |
| 2        | 0,26                               | 1,28 | 0,7  | 0,017 | 0,04  | 0,069 | 0,13 | 0,26 |

Таблица 4

Сравнение расчетных и экспериментальных значений механических свойств арматурного проката диаметром 10 мм из стали марки 25Г2С

| №<br>п/п | Значения механических свойств  |           |                                |           |                         |           |
|----------|--------------------------------|-----------|--------------------------------|-----------|-------------------------|-----------|
|          | $\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup> |           | $\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup> |           | $\delta_5$ , %          |           |
|          | Экспериментальные              | Расчетные | Экспериментальные              | Расчетные | Экспериментальные       | Расчетные |
| 1        | <u>870-920</u><br>885          | 907       | <u>1120-1180</u><br>1143       | 1145      | <u>9,5-15</u><br>11,9   | 13,2      |
| 2        | <u>870-960</u><br>914          | 944       | <u>1130-1210</u><br>1168       | 1184      | <u>9,2-14,5</u><br>11,6 | 12,9      |

Приведенные данные показывают удовлетворительную точность прогнозирования механических свойств арматурного проката. В ходе микроструктурных исследований установлено, что в термически упрочненном арматурном прокате диаметром 10 мм образуется 79-83 % самоотпущенного мартенсита и 17-21 % бейнита. Полученные данные позволяют рекомендовать комплексную математическую модель для расчета энергосиловых параметров процесса непрерывной сортовой прокатки и прогноза механических свойств готового термомеханически упрочненного арматурного проката.

### Выводы

1. С использованием разработанного комплексного программного обеспечения, позволяющего моделировать процесс непрерывной сортовой прокатки и прогнозировать механические свойства готового проката провели вычислительный эксперимент для получения в готовом прокате заданного комплекса свойств при производстве термомеханически упрочненного проката диаметром 10 мм класса прочности Ат-V из стали марки 25Г2С, получаемого методом прокатки-разделения на пять ниток из заготовок сечением 140x140 мм в условиях стана 320 БМЗ.
2. В результате проведенного вычислительного эксперимента установлено, что усилие прокатки в 1, 5 и 19 рабочих клетях превышает допустимые их техниче-

ской характеристикой значения. В то же время значения момента и мощности прокатки находятся в пределах допустимых.

3. Предложено, что снять ограничения по усилиям прокатки можно перераспределением обжатий по клетям стана.

После изменения режима обжатий в перегруженных клетях и переноса части деформации в другие клетки ограничения были устранены.

Таким образом, изменение режима обжатий позволяет производить указанный арматурный профиль №10 из стали марки 25Г2С оптимального состава, получаемый методом прокатки-разделения на пять ниток из заготовок сечением 140х140 мм с сохранением существующего на стане температурно-скоростного режима прокатки и не требует изменения конструктивно-структурного состава стана.

4. Результаты расчетов показали, что наиболее оптимальной температурой конца прокатки для осуществления последующей термомеханической обработки проката с целью получения заданного комплекса свойств (оптимального соотношения прочностных и пластических свойств) готового арматурного проката из стали марки 25Г2С является 1000 °С.

При этой температуре конца прокатки и температура самоотпуска (порядка 425-430 °С) является оптимальной для термомеханически упрочненного арматурного проката диаметром 10 мм класса прочности Ат800.

5. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных, полученных при производстве термомеханически упрочненного арматурного проката из стали марки 25Г2С показало удовлетворительную сходимостъ прогнозируемых и фактических значений механических свойств.

**Список литературы:** 1. Теория прокатки / Целиков А.И., Томленов А.Д., Зюзин В.И. и др. Справочник. - М.: Металлургия, 1985. - 235 с. Е.С. Глуховский. Новые технологические решения в проектах сортопрокатных цехов // Черная металлургия: Бюл. ин-та "Черметинформация". М.- 1999. - № 7. - 8 - С.36-39. В.С. Медведев, Ю.Б. Крюков, В.В. Осипенко. Сортопрокатные станы // Металлург. 2005. Спецвыпуск. С.18-21. Л.А. Никитина, Б.Н.Матвеев. Перспективные технологии, используемые в производстве прутков и катанки за рубежом // Черная металлургия: Бюл. ин-та "Черметинформация". М. - 2003. - № 3. - С.36-44. Мадатян С.А. Арматура железобетонных конструкций. – М.: Воентехлит, 2000. - 256 с. Никитина Л.А. Состояние и перспективы развития производства проката в России и за рубежом // Производство проката. – 2000. - №11. С.2-10. Производство термомеханически упрочненной стержневой арматуры / Д.Н. Макаров, Е.Н. Колельков, А.П. Диденко, А.А. Пьянков // Сталь. – 2008. - № 3. С.53-55.

**УДК 669.015**

**ЧИГИРИНСКИЙ В.В.**, докт. техн. наук, проф., ЗНТУ, г. Запорожье

**ДУБИНА В.И.**, канд. техн. наук, проф., ЗНТУ, г. Запорожье

**МИСНИК Е. Н.**, студентка, ЗНТУ, г. Запорожье

## **ЭФФЕКТЫ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

Рассмотрены эффекты пластической деформации. Эффект дополнительного воздействия на очаг деформации и эффект кинематического воздействия на зону пластического течения металла.

Ключевые слова:

Очаг деформации, прокатка, линейки, полоса, момент.

Розглянуто ефекти пластичної деформації. Ефект додаткової дії на осередок деформації і ефект кінематичної дії на зону пластичного течії металу.

Ключові слова:

Вогнище деформації, прокатка, лінійки, смуга, момент.

Considered effects of plastic deformation. Effect of the additional affecting hearth of deformation and effect of the kinematics affecting area of plastic flow of metal.

Key words:

Hearth of deformation, rolling, lines, bar, moment.

## **1. Введение**

Особенностью дополнительного воздействия на очаг деформации является то, что усилие этого воздействия меньше основного усилия, связанного с пластическим формоизменением в зоне течения металла. Эффект кинематического воздействия на зону пластического течения проявляет себя в создании условий, при которых снижается усилие прокатки, контактные давления.

## **2. Постановка проблемы**

При разработке новых процессов и технологий необходимо знать общие закономерности пластического течения материала, их особенности. Реальные процессы всегда сопровождаются неоднородностью пластического течения, вызванные разными причинами. Считается, что неравномерность деформации является отрицательным фактором, который увеличивает энергозатраты, износ оборудования, ухудшает качество изделий, их точность. Изучение влияния неоднородности пластического течения на кинематические и силовые параметры процесса представляет не только теоретический, но и практический интерес.

Рассмотрим два эффекта пластической деформации в условиях неравномерного напряженно-деформированного состояния – это эффект дополнительного воздействия на очаг деформации и эффект кинематического воздействия на зону пластического формоизменения.

### **Эффект дополнительного воздействия на очаг деформации**

Эффект заключается в том, что усилие дополнительного воздействия на очаг деформации меньше, чем усилие вызвавшее пластическое течение в зоне формоизменения. При прокатке или прессовании свинцовой полосы передний конец можно искривлять рукой, не испытывая при этом значительного сопротивления. Если процесс деформации остановить то, усилия, которое необходимо приложить к полосе для ее деформирования будут намного больше.

Использование дополнительного воздействия на очаг может себя оправдать при реализации необходимых технологических операций. Покажем это на примере исследовании давления внешних частей полосы на боковые линейки, в условиях несимметричного обжатия по ширине. Дополнительное воздействие представляет воздействие боковых линеек на внешние части полосы, которые, в свою очередь, на очаг деформации со стороны входа и выхода. Это воздействие приводит к изменению кинематических и силовых параметров. Кинематический эффект заключается в выравнивании вытяжек по ширине и высоте полосы, а силовой в появлении дополнительных напряжений, определяющих напряженное состояние отдельных элементов профиля и полосы в целом.

Для подтверждения этого факта был поставлен эксперимент на стане 150. Прокатывались несимметричные ступенчатые полосы, рис.1 с различными отношениями  $B_1 / B_0$  и  $\eta_{min} / \eta_{max} = H_1 / H_0$ . Для замера давления полосы на линейки были сконструированы и изготовлены роликовые линейки и месдозы балочного типа. Последние воспринимали усилия со стороны полосы через линейки. Образцы изготавливались из свинца прессованием. Прокатывалось несколько партий образцов с разными размерами заготовки. Отношения  $B_1 / B_0$  и  $H_1 / H_0$  находились в пределах 0,50...0,93 и 0,65...0,91.

После обжатия участки имели одинаковую толщину. В каждой партии использовалось по четыре образца с различным отношением  $B_1 / B_0$ . Они имели примерно одинаковое отношение  $H_1 / H_0$  и высоту до прохода. Анализ показывает, что силы со стороны вводной и выводной линеек разные. Со стороны входа давление в 2,0 ... 2,6 раза больше, чем со стороны выхода.

С увеличением неравномерности обжатия, увеличивается воздействие полосы на линейки. Из таблицы 1 следует, что при отношениях  $B_1 / B_0 = 0,93$  и  $H_1 / H_0 = 0,73$  давления на входе и выходе со стороны линеек равны 932,0 и 376,0 Н. При отношениях 0,52 и 0,77 силы возрастают до 1783,0 и 770,0 Н.

Давления, действующие со стороны входа, находятся в пределах 480,0...1952,0 Н. Со стороны выхода - 212,0...838,0 Н. Моменты сил в пределах 40,5...162,0 Нм со стороны входа. Со стороны выхода 30,5...120,9 Нм.

Величина момента со стороны линеек определяется дополнительными напряжениями, возникающих в результате неравномерного обжатия по ширине профиля. Соответствующие сечениям пластические моменты изгиба колеблются в пределах, на входе 152,0...234,2 Нм, на выходе 97,9...197,5 Нм, что как видно значительно больше экспериментальных значений, см табл.1.

В работе [1] рекомендуется пользоваться отношением  $M_{экс} / M_{пл}$ , так как оно не зависит от предела текучести и абсолютных размеров полосы, и определяется параметром  $\delta$ , который характеризует величину момента со стороны линеек. Обработав экспериментальные данные, представленные в таблице1, получена зависимость момента со стороны линеек от параметра  $\delta$ , т.е. вида  $M = f(\delta)$ , [1]. Сопоставление экспериментальных значений моментов и моментов пластического изгиба показывает их значительную разницу. В первом случае моменты представляют собой фактор воздействия на очаг деформации при пластическом течении металла в зоне обжатия. Во втором – при ее отсутствии в зоне формоизменения.

Дальнейший анализ показывает, что при прокатке напряжения сжатия и растяжения на входе и выходе из очага деформации не достигают своего максимального значения равного пределу текучести. Они определяются величиной напряжений, достаточных для выравнивания вытяжек по ширине и высоте очага деформации. Следовательно, моменты со стороны линеек находятся в соответствии с дополнительными напряжениями, возникающих в результате неравномерного обжатия по ширине профиля и полосы.

Данный эффект имеет место при совмещении операций, сопровождающихся пластической деформацией. Например, завивка полосы в обечайку при одновременном ее поперечном изгибе.

Таблица 1

Экспериментальные значения сил и моментов со стороны боковых линеек

| №/№ | $\frac{B_1}{B_0}$ | $\frac{H_1}{H_0}$ | Значения сил $P_{вх}$ и $P_{вых}$ Н |       | Значения моментов сил $M_{вх}$ и $M_{вых}$ Нм |       | Отношения $\frac{P_{вх}}{P_{вых}}$ | Отношения $\frac{M_{вх}}{M_{вых}}$ |
|-----|-------------------|-------------------|-------------------------------------|-------|-----------------------------------------------|-------|------------------------------------|------------------------------------|
|     |                   |                   | Вход                                | Выход | Вход                                          | Выход |                                    |                                    |
| 1   | 2                 | 3                 | 4                                   | 5     | 6                                             | 7     | 8                                  | 9                                  |
| 1   | 0,91              | 0,87              | 628,0                               | 275,0 | 53,60                                         | 39,5  | 2,3                                | 1,4                                |
| 2   | 0,78              | 0,83              | 1080,0                              | 490,0 | 91,5                                          | 70,6  | 2,2                                | 1,3                                |
| 3   | 0,62              | 0,87              | 1115,0                              | 487,0 | 96,1                                          | 70,2  | 2,3                                | 1,4                                |
| 4   | 0,52              | 0,91              | 1051,0                              | 485,0 | 93,6                                          | 69,8  | 2,2                                | 1,3                                |
| 1   | 0,93              | 0,73              | 932,0                               | 376,0 | 75,6                                          | 54,1  | 2,5                                | 1,4                                |
| 2   | 0,77              | 0,76              | 1340,0                              | 550,0 | 110,7                                         | 79,2  | 2,5                                | 1,4                                |
| 3   | 0,62              | 0,72              | 1952,0                              | 780,0 | 162,0                                         | 112,3 | 2,5                                | 1,4                                |
| 4   | 0,52              | 0,77              | 1783,0                              | 770,0 | 153,0                                         | 111,0 | 2,3                                | 1,4                                |
| 1   | 0,92              | 0,88              | 564,0                               | 250,0 | 48,5                                          | 36,0  | 2,3                                | 1,3                                |
| 2   | 0,77              | 0,88              | 955,0                               | 390,0 | 83,2                                          | 56,2  | 2,5                                | 1,5                                |
| 3   | 0,62              | 0,83              | 1210,0                              | 563,0 | 105,0                                         | 81,0  | 2,2                                | 1,3                                |
| 4   | 0,52              | 0,80              | 1500,0                              | 689,0 | 132,6                                         | 99,4  | 2,2                                | 1,3                                |
| 1   | 0,92              | 0,76              | 772,0                               | 319,0 | 62,4                                          | 46,5  | 2,4                                | 1,4                                |
| 2   | 0,77              | 0,75              | 1225,0                              | 478,0 | 100,2                                         | 69,0  | 2,6                                | 1,5                                |
| 3   | 0,62              | 0,75              | 1805,0                              | 786,0 | 151,2                                         | 113,2 | 2,3                                | 1,3                                |
| 4   | 0,52              | 0,74              | 1860,0                              | 838,0 | 157,5                                         | 120,9 | 2,2                                | 1,3                                |
| 1   | 0,93              | 0,66              | 680,0                               | 257,0 | 55,5                                          | 37,0  | 2,6                                | 1,5                                |
| 2   | 0,77              | 0,65              | 1255,0                              | 505,0 | 104,0                                         | 72,8  | 2,5                                | 1,4                                |
| 3   | 0,63              | 0,67              | 1290,0                              | 520,0 | 109,8                                         | 74,9  | 2,5                                | 1,4                                |
| 1   | 0,91              | 0,80              | 502,0                               | 212,0 | 42,3                                          | 30,5  | 2,4                                | 1,4                                |
| 2   | 0,75              | 0,83              | 840,0                               | 378,0 | 71,6                                          | 54,5  | 2,2                                | 1,3                                |

### Эффект кинематического воздействия на очаг деформации

Эффект кинематического воздействия на очаг деформации заключается в изменении напряженного состояния среды за счет кинематики течения металла, что проявляет себя в снижении силы пластического формоизменения в условиях неравномерного обжатия.

Дополнительные напряжения, вызванные кинематикой течения металла, могут изменить силу прокатки. Кинематическое воздействие может повлиять на полное давление, если его влияние на напряженное состояние отдельных элементов будет разное. Данное предположение было проверено экспериментальным путем на лабораторном стане 210. Прокатывались полосы в условиях неравномерной деформации по ширине. Прямоугольные заготовки задавались в калибр с разной геометрией центральной части, рис.2

При этом фиксировалось усилие прокатки. Разные параметры «волны» определяли разную ширину центрального элемента и, следовательно, разную поперечную деформацию. Отсюда, разную величину продольного взаимодействия, табл. 2. Отличие варианта *a* от *b* заключается в том, что при

Таблица 2

Экспериментальные значения относительных усилий прокатки в зависимости от коэффициента поперечной деформации.

| Толщина,<br>Н мм | Отношение<br>$S_1 / S_0$ | Коэффициент поперечной деформации<br>$B'_1 / B_1$ |      |      |      |
|------------------|--------------------------|---------------------------------------------------|------|------|------|
|                  |                          | 1,00                                              | 1,06 | 1,08 | 1,11 |
|                  |                          | Отношение сил $P_1 / P_0$                         |      |      |      |
| 2,0              | 0,42                     | 1,00                                              | 0,94 | 0,92 | 0,90 |
|                  | 0,50                     | 1,00                                              | 0,95 | 0,94 | 0,90 |
|                  | 0,80                     | 1,00                                              | 0,96 | 0,94 | 0,89 |
| 3,0              | 0,42                     | 1,00                                              | 0,94 | 0,93 | 0,89 |
|                  | 0,50                     | 1,00                                              | 0,94 | 0,93 | 0,90 |
|                  | 0,80                     | 1,00                                              | 0,95 | 0,94 | 0,89 |
| 4,0              | 0,42                     | 1,00                                              | 0,96 | 0,94 | 0,91 |
|                  | 0,50                     | 1,00                                              | 0,97 | 0,96 | 0,90 |
|                  | 0,80                     | 1,00                                              | 0,96 | 0,95 | 0,82 |
| 5,0              | 0,42                     | 1,00                                              | 0,96 | 0,95 | 0,92 |
|                  | 0,50                     | 1,00                                              | 0,97 | 0,97 | 0,91 |
|                  | 0,80                     | 1,00                                              | 0,96 | 0,96 | 0,94 |
| 6,0              | 0,42                     | 1,00                                              | 0,97 | 0,95 | 0,92 |
|                  | 0,50                     | 1,00                                              | 0,98 | 0,97 | 0,92 |
|                  | 0,80                     | 1,00                                              | 0,99 | 0,97 | 0,93 |
| 7,0              | 0,42                     | 1,00                                              | 0,96 | 0,94 | 0,92 |
|                  | 0,50                     | 1,00                                              | 0,98 | 0,97 | 0,92 |
|                  | 0,80                     | 1,00                                              | 0,98 | 0,97 | 0,93 |

одинаковой неравномерности деформации по ширине, отношение  $h_1 / h_2$ , продольное взаимодействие участков 1 и 2 разное из-за неодинакового стремления металла течь в длину 1-го элемента. Продольная деформация определяется не только коэффициентами деформаций  $H / h_2$  и  $H / h_1$ , но и поперечной деформацией каждого элемента. Для элемента 1, за счет кинематики течения металла искусственно формируется большая ширина центрального участка (волнообразная форма). Следовательно, в элементе с большим обжатием, необходимо больше металла «перегнать» в ширину в сравнении с вариантом  $b$ . Это ограничивает стремление металла течь в длину, что изменяет коэффициенты частной и средней вытяжек и, в общем, отношение  $\ln \mu_{cp} / \mu_k$ , характеризующее взаимодействие элементов профиля. Уменьшается продольный подпор, возможно изменение знака дополнительного напряжения 1-го элемента. Уменьшается контактное давление. В элементе 2, где обжатие меньше произойдет увеличение коэффициента подпора, либо за счет уменьшения растягивающих дополнительных напряжений, либо за счет появления продольных сжимающих напряжений. Т.к. обжатия элементов разные, то следует ожидать разное изменения контактных давлений смежных участков полосы. Если эта разница давлений достаточная, то ее можно зафиксировать экспериментально месдозами. Величины  $P_0$  и  $P_1$  - обозначают полные давле-

ния металла на валки, которые возникают при прокатке профилей с разной геометрией центральной части (ровная и волнообразная).

Таким образом, регулируя кинематику течения металла процессом пластической деформации можно управлять.

Полученный результат представляет собой количественную модель эффекта, который дает новые технологические возможности прокатки сортовых профилей разного назначения. Снижение давления на валки приводит к уменьшению пружины клетки и, отсюда, уменьшению толщины раската. Появляются условия для прокатки тонкостенных профилей, за счет появившейся возможности «выдавить» профиль по толщине.

**Список литературы:** 1. Чигиринский В.В. Экспериментальное исследование моментов сил при стремлении полосы к искривлению на входе в очаг деформации и выходе из него // Изв. вузов. Черная металлургия.-1983.-№11.- С.85-88.

**УДК 669.013**

**СТАЛИНСКИЙ Д.В.**, докт. техн. наук, УкрГНТЦ «Энергосталь»,  
**РУДЮК А.С.**, канд. техн. наук, УкрГНТЦ «Энергосталь», г. Харьков  
**МЕДВЕДЕВ В.С.**, канд. техн. наук, УкрГНТЦ «Энергосталь»,  
**КРЮКОВ Ю.Б.**, УкрГНТЦ «Энергосталь», г. Харьков

## **ВОПРОСЫ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ СОЗДАНИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МИКРО-ЗАВОДОВ**

Рассмотрены вопросы ресурсосбережения и энергоэффективности при создании металлургических микрозаводов. Определены рациональные пути экономии энергетических и материальных ресурсов, дан анализ наиболее перспективным энерго- и ресурсосберегающим технологиям производства фасонных профилей малотоннажными партиями.

Ключевые слова: микрозавод, экономичные профили, малотоннажные партии, ресурсосбережение, энергоэффективность

Розглянуто питання ресурсозбереження й енергоефективності при створенні металургійних мікрозаводів. Визначено раціональні шляхи економії енергетичних і матеріальних ресурсів, даний аналіз найбільш перспективним енерго- і ресурсозберігаючим технологіям виробництва фасонних профілів малотоннажними партіями.

Ключові слова: мікрозавод, економічні профілі, малотоннажні партії, ресурсозбереження, енергоефективність

Issues of resource-saving and power efficiency at setting-up iron and steel micro-plants are considered. Rational ways to save power and material resources are specified, the most perspective power- and resource-saving technologies for producing shaped sections by small-tonnage lots are analyzed.

Keywords: micro-plant, economical sections, small-tonnage lots, resource-saving, power-efficiency

### **1. Введение**

Микрозавод – это небольшой мощности, компактный, гибкий и легко переналаживаемый литейно-прокатный комплекс с возможностями удовлетворения быстро меняющегося спроса на продукцию [1].

В силу небольших объемов производства, на микрозаводах сложно достичь таких же высоких удельных показателей работы металлургических агрегатов, как на крупных металлургических предприятиях. Поэтому вопросы энерго- и ресурсосбережения для микрозаводов являются первостепенными. Без комплексного

решения вопросов ресурсосбережения и энергоэффективности микрозаводы теряют свои конкурентные преимущества и становятся экономически нецелесообразными. Следует отметить, что помимо чисто экономических преимуществ, использование энерго- и ресурсосберегающих технологий также обеспечивает существенное улучшение экологических показателей работы микрозаводов.

## **2. Постановка проблемы**

Микрозаводы в основном предназначены для производства экономичных фасонных профилей широкого сортамента, поставляемых малотоннажными партиями. Обеспечение рентабельности такого предприятия гарантируется высокой ценой на малотоннажные фасонные профили проката, которая в 2–3 раза превышает цену на рядовой прокат. Повышение рентабельности может быть достигнуто за счет использования местных сырьевых ресурсов, топлива и электроэнергии, сокращения транспортных расходов, а также использования существующих зданий, сооружений и других объектов инфраструктуры. Микрозаводы небольшой мощности можно максимально приблизить к потребителям металлопродукции, что позволяет сократить путь от производителя к потребителю, минуя посредников, чья прибыль, может быть получена непосредственно производителем, а это является дополнительным фактором повышения экономической эффективности производства.

При анализе ресурсосбережения и энергоэффективности микрозаводов следует иметь в виду ресурсосберегающую и энергетическую эффективность выпускаемой продукции. Так, экономия металла у потребителя в среднем от применения одной тонны фасонного проката специального назначения составляет 15 %. Соответственно снижаются расход сырья и энергии, а также сокращаются вредные выбросы.

Еще больший эффект достигается при производстве специальных видов проката повышенной готовности. Характерным примером такой технологии является производство периодических профилей для малолистовых рессор. Так, металлоемкость малолистовой рессорной подвески, по сравнению с обычной, ниже на 30–50 %, а долговечность в 1,5–2,0 раза выше за счет исключения фреттинг-коррозии листов при уменьшении их количества в 3–5 раз [2]. Следует также учитывать, что снижение металлоемкости подвески приводит к экономии трудовых и энергетических затрат у изготовителя рессор, снижению расхода топлива, шин, вибронагруженности и повышению плавности хода, улучшению комфортабельности, увеличению надежности и долговечности автомобиля в целом.

Таким образом, энергоресурсосберегающий и экологический эффект от экономических профилей проката достигается как на стадии их производства на металлургических заводах, так и при использовании профилей у потребителей металлопродукции.

Микрозаводы по сути своей являются ресурсосберегающими, поскольку исходным сырьем для них является вторичное сырьё - металлолом и отсутствуют переделы, предшествующие сталеплавлению, что резко сокращает расход ресурсов и энергоносителей на производство единицы продукции.

На современных микрозаводах практически на каждом этапе технологического процесса используются ресурсосберегающие энергоэффективные технологии, такие как выплавка стали в дуговых электропечах постоянного тока, непрерывная разливка стали, совмещение непрерывной разливки с прокаткой (горячий посад); использование гибких безинерционных способов нагрева металла; оптимизацию сече-

ний и массы исходных заготовок, температурных и деформационно-скоростных режимов прокатки; низкотемпературную и контролируемую прокатку; термическую обработку с использованием тепла прокатного нагрева; совершенствование схем расположения оборудования прокатных станов и другие.

Наиболее мощными экологическими и энерго- и ресурсосберегающими факторами являются производство сортового проката из непрерывнолитых заготовок и совмещение непрерывной разливки стали и прокатки заготовок с использованием тепла разливки [3, 4]. Переход прокатных станов на использование непрерывнолитых заготовок позволяет увеличить на 10–15 % выход годного, снизить расход стали при производстве проката в среднем на 200–289 кг/т, уменьшить на 20–40 % затраты на топливно-энергетические ресурсы [5].

По оценкам экономистов, 80 % энергии в прокатном производстве затрачивается на обычный нагрев металла до 1150 °С, 17 % – на прокатку и только 3 % – на вспомогательные операции. Поэтому разрабатываемые мероприятия по энергосбережению должны в первую очередь быть направлены на совершенствование технологии нагрева металла под прокатку и нагревательного оборудования. В технологической части усилия должны быть направлены как на повышение эффективности самого нагрева металла с максимально возможным сокращением тепловых потерь, так и на утилизацию тепла.

При непрямом совмещении непрерывной разливки стали и прокатки с использованием тепла разливки нагревательная печь загружается горячими заготовками (500–850 °С), поступающими с МНЛЗ.

Кроме того, возможна прямая прокатка, когда полученные на МНЛЗ заготовки достаточно большого сечения (с температурой 950–1000 °С) подаются для прокатки непосредственно в первую (обжимную) клеть сортового стана. При этом, для уменьшения нагрузок на черновые и промежуточные клетки сортового стана, может использоваться индукционный подогрев металла. В результате внедрения данной технологии обеспечивается экономия тепла до 80 %.

Специфика работы микрозаводов превращает в востребованные гибкие безинерционные способы индукционного нагрева металла.

Приведем сравнение энергозатрат и экономической эффективности нагрева металла в газовых и индукционных нагревательных устройствах. В качестве примера нагреву до температуры 1200 °С подвергаются холодные заготовки сечением 85х85 мм длиной 1500 мм. Полезная мощность на нагрев металла с производительностью 5 т/час составляет 1200 кВт. Эта мощность одинакова при любом способе нагрева. С учетом теплового коэффициента полезного действия (КПД) в газовых печах, равном 0,2, затраты энергии на нагрев заготовок составят 6000 кВт, что эквивалентно расходу природного газа 600 м<sup>3</sup>/ч. При индукционном нагреве металла тепловой КПД можно принять равным 0,66, при этом затраты энергии на нагрев металла – 1810 кВт. Таким образом, экономия энергии при индукционном нагреве – 69,9 %. Срок окупаемости капитальных затрат – 2 года.

Применение индукционных нагревательных устройств обеспечивает высокоскоростной нагрев металла практически без угара и затрат электроэнергии на холостом ходу. Индукционный нагрев металла особенно эффективен на станах, где имеют место частые простои при перевалках, переходах с профиля на профиль, настройках стана и др.

Технология производства сортового проката на новых и действующих прокатных станах микрозаводов должна осуществляться из заготовок оптимальных размеров сечения и массы. Это обеспечит уменьшение расходного коэффициента металла, снижение угара металла, уменьшение количества окалины на 30–60 % и величины концевой обреза – от 20 до 70 % за счет увеличения выхода мерных длин в зависимости от вида выпускаемой продукции.

Для снижения расхода энергии при производстве проката исходные заготовки должны иметь минимальное сечение. В этом случае суммарная работа деформации будет минимальной. Кроме того, уменьшаются диаметры рабочих валков и количество рабочих клетей, а, следовательно – масса и стоимость оборудования стана в целом. Однако имеется ряд технологических ограничений, не позволяющих уменьшать сечение заготовок ниже определенного предела. Выбор сечения исходных заготовок в каждом конкретном случае должен осуществляться с учетом этих ограничений. Рекомендуемые размеры квадратных заготовок для мелкосортных станов микрозаводов от 65х65 до 120х120 мм (в зависимости от объемов производства и марочного сортамента).

Экономия энергоресурсов может достигаться также путем внедрения рациональных температурно-скоростных и деформационных режимов прокатки и совершенствования оборудования прокатных станов.

Одним из таких мероприятий является низкотемпературная прокатка, при которой температура нагрева металла на 200–250 °С ниже, чем при обычной прокатке. Проведенные исследования и расчеты показывают, что при снижении температуры нагрева металла с 1200–1270 °С до 1000–1050 °С экономия топлива составляет 110–130 кВт·ч/т (400–470 МДж/т). Затраты электроэнергии на прокатку возрастают на 15–18 кВт·ч/т. Однако суммарная экономия энергоресурсов составляет 12–15 % [6].

Применение низкотемпературной прокатки на сортовых станах сопровождается ростом усилий и моментов прокатки, увеличением износа прокатных валков. Следовательно, внедрению этой технологии должен предшествовать тщательный анализ изменения энергосиловых параметров прокатки. Особенно это касается прокатки тонкостенных профилей.

К ресурсо- и энергосберегающим технологиям следует отнести и термическую обработку с использованием тепла прокатного нагрева, поскольку, во-первых, за счет термической обработки повышаются служебные свойства металлопродукции, что ведет к экономии металла, – во-вторых, собственно термообработка не требует дополнительного (повторного) нагрева, т.е. рационально использует тепло прокатного нагрева, чем обеспечивается экономия энергоресурсов и снижение вредных выбросов. В-третьих, сокращаются потери металла на образование окалины, что особенно актуально при производстве профилей с малыми размерами поперечного сечения (арматура и катанка). Кроме того, экономятся значительные производственные площади и уменьшается количество оборудования.

Одним из основных направлений совершенствования сортопрокатного производства может стать разработка и внедрение энергосберегающих технологических процессов термомеханической обработки и их разновидностей – контролируемой или регулируемой прокатки.

Рациональная технология контролируемой прокатки обеспечивает стабилизацию технологического процесса, что очень важно для автоматического регулирова-

ния температуры металла и собственно технологического режима, а в конечном итоге – для получения проката с заданным уровнем свойств.

Разработанные в УкрГНТЦ «Энергосталь» теоретические методы расчета деформационно-скоростных и энергосиловых параметров прокатки, алгоритмическое и программное обеспечение систем автоматизированного проектирования позволяют проектировать рациональные технологические режимы регулируемой (контролируемой) прокатки [4].

Регулируемая прокатка с деформационным разогревом, в свою очередь, позволяет получать готовые профили более высокого качества, чем при холодной прокатке (за счет одновременного улучшения прочностных и пластических свойств металла). Все это позволяет совершенствовать технологию на стане любой конструкции, более эффективно внедрять регулируемую прокатку, повышающую механические характеристики металла, производить профили любой сложности, расширять и усложнять их сортамент, обеспечить повышение качества и точности проката, экономию металла и снижение энергозатрат, стабилизировать сбыт продукции и функционирование экологически чистого производства.

Таким образом, применение низкотемпературной контролируемой прокатки с интенсивным деформационным режимом обеспечивает снижение выбросов в атмосферу, а также образование шлаков и золы.

При непрерывной прокатке наибольшее падение температуры раската наблюдается в первых проходах. Из-за малой скорости прокатки значительная часть тепла расходуется на излучение и конвекцию во время пауз между проходами. Увеличение скорости прокатки, как правило, невозможно из-за необходимости соблюдения константы калибровки и возрастания мощности прокатки в черновых клетях. Использование малогабаритных обжимных блоков позволяет частично решить эту проблему. Так, при прокатке в блоке с расстоянием между клетями 1100–1300 мм (по сравнению с обжимной группой с расстоянием между клетями 3000 мм), падение температуры раската уменьшается на 2,4 %, а мощность прокатки – на 5 %. Следует отметить, что экономия энергии в этом случае достигается без увеличения расхода инструмента и степени загрузки оборудования, что характерно для низкотемпературной прокатки. При проектировании новых станов эффект от применения блоков усиливается за счет уменьшения длины стана и снижения массы оборудования, в т. ч. и вспомогательного (межклетьевые столы, рольганги и др.).

Процесс горячей прокатки характеризуется разогревом раската в процессе деформации. С увеличением скорости прокатки на непрерывных станах разогрев превышает потери тепла, что приводит к повышению температуры раската, а следовательно, не только к нерациональному расходу энергии на прокатку, но и ухудшению структуры и механических свойств, а также увеличению затрат энергии на охлаждение проката. В идеальном случае температура проката должна оставаться постоянной, близкой к температуре конца прокатки. Наиболее простой путь регулирования температуры раската – за счет скоростного режима прокатки. Снижение скорости прокатки в чистовых клетях непрерывных станов ведет к резкому снижению стойкости валков черновых клетей. На полунепрерывных станах, как правило, производительность непрерывной группы стана значительно выше производительности обжимной клетки, что дает возможность существенно снизить затраты энергии и скорость прокатки. Проведенные расчеты показывают, что для условий микрозаводов прокатка на полунепрерывном стане с использованием рациональных температурно-

скоростных режимов обеспечивает снижение расхода энергии на деформацию металла до 40 % по сравнению с прокаткой на непрерывном стане.

С использованием изложенных принципов в УкрГНТЦ «Энерго-сталь» разработаны 5 типов микрозаводов для производства экономичных профилей проката в объеме от 15 до 120 тыс. т в год.

Таким образом, комплексное решение вопросов ресурсосбережения и энергоэффективности путём внедрения энерго- и ресурсосберегающих технологий на всех стадиях технологического процесса позволяет достичь высокой экономической эффективности металлургических микрозаводов.

**Список литературы:** 1. Грищенко С.Г. Металлургические микрозаводы – решение проблемы производства фасонного проката малотоннажными партиями [Текст] / С.Г. Грищенко, Д.В. Сталинский, А.С. Рудюк и др. // Сталь. – 2008. – № 9. – С. 53–56. 2. Комаров А.Н. Способы производства профилей для малолистовых рессор [Текст] / А.Н. Комаров, А.Н. Литвин, В.И. Табака // Труды пятой международной научно-технической конференции «Теоретические проблемы прокатного производства» (г. Днепропетровск, 16–18 мая 2000 г.); Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – № 8–9. – С. 228–230. 3. Медведев В.С. Энергосберегающие технологии производства сортовых профилей на литейно-прокатных комплексах металлургических мини-заводов [Текст] / В.С. Медведев // Экология и промышленность. – 2008. – № 3. – С. 64–69. 4. Комплексное автоматизированное проектирование калибровок валков для прокатки сортовых профилей на базе типовых программных модулей [Текст] / В.С. Медведев, С.Б. Стрюков // Труды пятой международной научно-технической конференции «Теоретические проблемы прокатного производства» (г. Днепропетровск, 16–18 мая 2000 г.); Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – № 8–9. – С. 198–201. 5. Разработка программы и технико-экономических показателей использования в сортопрокатном производстве непрерывнолитой заготовки с учетом технического уровня металлургического оборудования, существующего и перспективного марочного и размерного сортамента проката: отчет о НИР [Текст] / УкрНИИМет. – Харьков, 1995. – 94 с. – № ГР 01944022123. 6. Вакула Л.А. Энергоэкономия при низкотемпературной прокатке та його вплив на якість металу і експлуатацію устаткування [Текст] / Л.А. Вакула, А.С. Рудюк // Экология и промышленность. – 2007. – № 4. – С. 54–59.

**УДК 621.777**

**ТРИШЕВСКИЙ О.И.**, докт. техн. наук, проф., ХНТУСХ им. П. Василенко,  
**ПЛЕСНЕЦОВ С.Ю.**, студент, НТУ «ХПИ»

### **ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФОРМОВКИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ С МЕСТАМИ ИЗГИБА НА 180°**

Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния металла при изгибе на 180° с использованием метода механики сплошных сред. На основании исследования распределения утонения в местах изгиба полосы при ее формоизменении получены поле скоростей движения частиц металла и компоненты скоростей деформации.

Ключевые слова: изгиб на 180°, механика сплошных сред, напряженно-деформированное состояние

Виконано аналіз напружено-деформованого стану металу при його згинанні на 180° із використанням методу механіки суцільних середовищ. На підґрунті дослідження розподілу тоншення в місцях згину полоси під час її формозмінення отримано поле швидкостей руху частинок металу та компоненти швидкості деформації.

Ключові слова: згин на 180°, механіка суцільних середовищ, напружено-деформований стан

The analysis of tense-deformed state of metal during 180° bending was accomplished using the method of continuous environments mechanics. Basing on previous researches of thinning spreading through the place of bending of a sheet during its forming the field of metal particles velocities and components of deformation speed were obtained.

Keywords: 180° bending, continuous environments mechanics, tense-deformed state

Теоретические исследования процессов обработки металлов давлением позволяют изучать закономерности пластического деформирования металлов, энергосиловые параметры различных технологических процессов, влияние трения и смазки на процессы обработки металлов давлением, а также обеспечивают возможность анализа изменения физико-механических свойств металлов, подвергающихся воздействию силовых и при необходимости температурных факторов.

В настоящей работе для анализа напряженно-деформированного состояния металла при валковой формовке профилей с местами изгиба на 180° и определения параметров, характеризующих процесс, использован *метод механики сплошных сред с описанием очага деформации полем скоростей перемещений*. Разработка и внедрение метода применительно к процессам пластического течения металла связана с работами Г.Я. Гуна [1], А.А. Ильюшина [2], Л.И. Седова [3, 4], Ю.Н. Алексеева [5,6] и др.

В основе метода лежит основной физический закон, определяющий связь между напряжениями и деформациями, выраженный через девиаторы напряжений ( $D_\sigma$ ), скоростей деформаций и коэффициент жесткости  $\mu_i$  [2]:

$$D_\sigma = 2\mu_i D_\varepsilon. \quad (1)$$

Коэффициент жесткости  $\mu_i$ :

$$\mu_i = \frac{\sigma_i}{3\varepsilon_i},$$

где  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений, Па;

$\varepsilon_i$  – интенсивность скоростей деформаций,  $\frac{1}{c}$ .

В зависимости от свойств исследуемых сплошных сред коэффициент жесткости может принимать значения в широком диапазоне: от нуля для идеальных жидкостей до бесконечности для абсолютно твердого тела.

Девиаторы напряжений и скоростей деформаций, входящие в формулу (1), можно выразить следующим образом:

$$D_\sigma = T_\sigma - \sigma T_0 \quad (2)$$

$$D_\varepsilon = T_\varepsilon - \varepsilon T_0, \quad (3)$$

где  $T_\sigma$  – тензор напряжений;

$T_\varepsilon$  – тензор скоростей деформаций;

$T_0$  – шаровой тензор;

$\sigma$  – среднее напряжение;

$\varepsilon$  – средняя скорость деформации.

Уравнения (2) и (3) позволяют описать зависимость между тензорами напряжений и скоростей деформаций

$$T_{\sigma} = 2\mu_i T_{\varepsilon} + \left(\sigma - \frac{2}{3}\mu_i \operatorname{div} \vec{V}\right) T_0, \quad (4)$$

где  $\vec{V}$  – объём тела.

Поскольку при пластическом деформировании выполняется закон сохранения объёма  $\operatorname{div} \vec{V} = 0$ , то уравнение (4) можно записать в виде:

$$T_{\sigma} = \sigma T_0 + 2\mu_i T_{\varepsilon} \quad (5)$$

Выражение (5) позволяет определить основные параметры пластического формоизменения металла при известном поле скоростей перемещений.

Поле скоростей перемещений в декартовой системе координат в общем виде может быть описано следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} v_x &= v(x, y, z, t) \\ v_y &= v(x, y, z, t) \\ v_z &= v(x, y, z, t) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $x, y, z$  – соответствующие координаты;

$t$  – время формоизменения.

Одна из составляющих скоростей определена, поскольку известен закон перемещения рабочего инструмента. Для определения остальных используется условие постоянства объёма

$$\frac{dv_x}{dx} + \frac{dv_y}{dy} + \frac{dv_z}{dz} = 0. \quad (7)$$

С использованием зависимости (5) можно получить уравнения связи между напряжениями и скоростями деформаций в декартовой системе координат:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \sigma + 2\mu_i \varepsilon_{xx}; & \tau_{xy} &= \mu_i \varepsilon_{xy}; \\ \sigma_{yy} &= \sigma + 2\mu_i \varepsilon_{yy}; & \tau_{yz} &= \mu_i \varepsilon_{yz}; \\ \sigma_{zz} &= \sigma + 2\mu_i \varepsilon_{zz}; & \tau_{zx} &= \mu_i \varepsilon_{zx}. \end{aligned} \quad (8)$$

Скорости деформаций, входящие в (8), (при известном поле скоростей перемещений) определяются по следующим зависимостям:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{dv_x}{dx}; & \varepsilon_{xy} &= \frac{dv_x}{dy} + \frac{dv_y}{dx}; \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{dv_y}{dy}; & \varepsilon_{yz} &= \frac{dv_y}{dz} + \frac{dv_z}{dy}; \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{dv_z}{dz}; & \varepsilon_{zx} &= \frac{dv_z}{dx} + \frac{dv_x}{dz}. \end{aligned} \quad (9)$$

При простом нагружении, компоненты деформаций и скоростей деформаций связаны следующими интегральными соотношениями:

$$\begin{aligned} e_{xx} &= \int_0^t \varepsilon_{xx} dt; & e_{yy} &= \int_0^t \varepsilon_{yy} dt; & e_{zz} &= \int_0^t \varepsilon_{zz} dt; \\ e_{xy} &= \int_0^t \varepsilon_{xy} dt; & e_{yz} &= \int_0^t \varepsilon_{yz} dt; & e_{zx} &= \int_0^t \varepsilon_{zx} dt. \end{aligned} \quad (10)$$

Значения интенсивностей напряжений, скоростей деформаций и деформаций

определяются по следующим зависимостям:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (11)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + (\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{zz})^2 + (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx})^2 + \frac{3}{2}(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{zx}^2)} \quad (12)$$

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_{xx} - e_{yy})^2 + (e_{yy} - e_{zz})^2 + (e_{zz} - e_{xx})^2 + \frac{3}{2}(e_{xy}^2 + e_{yz}^2 + e_{zx}^2)} \quad (13)$$

Для упрочняющегося в процессе пластической деформации материала интенсивность напряжений  $e_i$  определяется степенной зависимостью [90]:

$$\sigma_i = K e_i^m, \quad (15)$$

где  $K$  и  $m$  – константы, определяемые экспериментально при испытании на растяжение-сжатие для каждого конкретного материала.

Работа пластической деформации определяется по формуле:

$$A = \int_{(t)} \left( \iiint_{(V)} E dV \right) dt, \quad (16)$$

где  $E = \sigma_i \varepsilon_i$  – функция диссипации, описывающая работу, затраченную на деформирование единицы объема в единицу времени.

Для обоснованного выбора параметров рациональной технологии профилирования необходимо исследовать характер напряженно-деформированного состояния металла по схеме цилиндрического изгиба.

В качестве основного материала при изготовлении профилей повышенной производственной готовности с покрытиями применяют сталь Ст3, в качестве покрытия – поливинилхлоридную пленку; лакокрасочное покрытие; цинк, алюминий, медь или их сплавы. Зачастую используются многослойные покрытия. Относительное удлинение материала покрытий значительно (на 15...100%) больше значения относительного удлинения стали, поэтому для оценки возможности радиального растяжения при изгибе необходимо выполнить анализ напряженно-деформированного состояния основного металла.

Скорость частиц металла полосы в месте изгиба зависит от их положения и является функцией координат рассматриваемой точки. Рассматривать процесс будем в цилиндрических координатах.

Перемещение металла в местах изгиба вдоль полосы (ось  $z$ ) отсутствует, поэтому осевая составляющая скорости

$$v_z = 0 \quad (17)$$

Остальные две составляющие — радиальная  $v_r$  и тангенциальная  $v_\varphi$  — будут зависеть от всех трех координат.

Экспериментальные исследования утонения в местах изгиба показали, что по мере прохождения полосы через валки профилегибочного стана, т.е. с уменьшением внутреннего радиуса места изгиба, утонение увеличивается. При этом по ширине места изгиба оно развивается неравномерно и является функцией угла  $\varphi$  в месте изгиба.

Так как скорости частиц металла тождественно равны перемещениям в единицу времени, изложенное выше позволяет записать радиальную составляющую скорости в общем виде следующим образом:

$$v_r = \left( Ar + \frac{B}{r} \right) J(\varphi) \frac{z}{l} \quad (18)$$

где  $r$  - текущий радиус точки в месте изгиба;

$A$  и  $B$  - постоянные коэффициенты;

$J(\varphi)$  - функция угла, учитывающая зависимость радиальной составляющей скорости этого угла;

$z$  - аппликата поперечного сечения полосы;

$l$  - длина участка полосы, на котором происходит утонение (сумма длин очагов деформации перед осевой плоскостью валков по всем проходам).

Длина участка полосы  $l$ , на котором происходит утонение, принимается как сумма длин очагов деформаций перед осевой плоскостью валков по всем проходам в качестве допущения, предполагающего, что утонение развивается только на участках очагов деформации перед осевой плоскостью валков. За осевой плоскостью валков угол подгибки полки на участке очага деформации изменяется незначительно по сравнению с изменением его перед осевой плоскостью валков. При этом будем считать, что утонение распределяется равномерно по всей длине  $l$  (рис. 1):

$$\Delta s = \Delta s_{\max}, \quad (19)$$

где  $\Delta s_{\max}$  - максимальное значение утонения на готовом профиле.

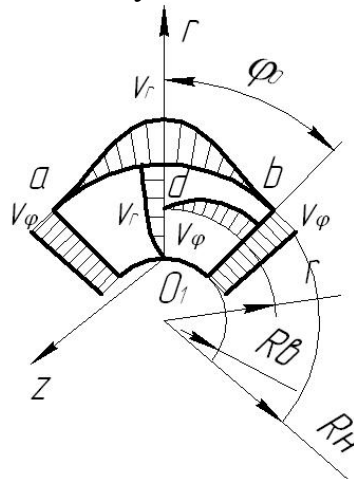


Рис. 1. Эпюры поля скоростей перемещения при изгибе

Для нахождения коэффициентов  $A$  и  $B$  уравнения (18) рассмотрим перемещение точек металла, лежащих на биссектрисе угла изгиба (при  $\varphi = 0$ ) поперечного сечения полосы в последней клетки, т.е. сечения  $z = l$ .

В этом сечении частицы металла по биссектрисе угла изгиба перемещаются только вдоль радиуса, что позволяет принять в уравнении радиальной составляющей скорости для этих точек  $J(\varphi)=1$ , после чего уравнение (18) можно записать в следующем виде:

$$v_r = Ar + \frac{B}{r} \quad (20)$$

Коэффициенты  $A$  и  $B$  уравнения (20) можно определить из граничных условий формоизменения полосы в валках профилегибочного стана:

$$v_r = 0 \text{ при } r = R_b; \quad (21)$$

$$v_r = -v_0 \text{ при } r = R_n.$$

Подставив уравнение (21) в (20), получим систему двух уравнений с двумя неизвестными  $A$  и  $B$ :

$$\begin{cases} AR_B + \frac{B}{R_B} = 0 \\ AR_H + \frac{B}{R_H} = 0 \end{cases} \quad (22)$$

Решая систему уравнений (22), находим значения коэффициентов  $A$  и  $B$ :

$$\begin{cases} A = -\frac{v_0 \cdot R_B^2}{R_H - \frac{R_B^2}{R_H}} \\ B = -\frac{v_0 \cdot R_B^2}{R_H - \frac{R_B^2}{R_H}} \end{cases} \quad (23)$$

Подставив полученные значения коэффициентов (23) в уравнение (18), после преобразований получим следующее выражение для радиальной составляющей скорости:

$$v_r = -\frac{v_0}{R_H - \frac{R_B^2}{R_H}} \left( r - \frac{R_B^2}{r} \right) J(\varphi) \frac{z}{l} \quad (24)$$

В выражении (24) неизвестна функция  $J(\varphi)$ . На основании экспериментальных исследований установлено [7], что изменение утонения по ширине места изгиба описывается функцией следующего вида:

$$J(\varphi) = \cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \quad (25)$$

Подставив в уравнение (24) выражение (25), определяющее функцию  $J(\varphi)$ , получим окончательное выражение для радиальной составляющей скорости:

$$v_r = -\frac{v_0}{R_H - \frac{R_B^2}{R_H}} \left( r - \frac{R_B^2}{r} \right) \frac{z}{l} \cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \quad (26)$$

Для определения тангенциальной составляющей скорости воспользуемся уравнением неразрывности (7) в цилиндрической системе координат, которое в нашем случае ( $v_r = 0$ ) имеет вид:

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{v_r}{r} = 0 \quad (27)$$

Из уравнения (27) и выражения для радиальной составляющей (26) после очевидных преобразований и интегрирования получим следующее значение тангенциальной составляющей скорости:

$$v_\varphi = \frac{1}{\pi} v_0 \varphi_0 \frac{r}{R_H - \frac{R_B^2}{R_H}} \cdot \left( \frac{3}{4} \frac{\pi\varphi}{\varphi_0} + \frac{1}{8} \sin \frac{\pi\varphi}{\varphi_0} \right) \frac{z}{l} + C \quad (28)$$

Определив постоянную интегрирования  $C$  из граничного условия

$$v_\varphi = 0 \text{ при } \varphi = 0,$$

получаем окончательные формулы для определения составляющих скоростей движения частиц металла в месте изгиба полосы за счет уменьшения толщины:

$$\begin{cases} v_\varphi = \frac{1}{\pi} v_0 \varphi_0 \frac{r}{R_H - \frac{R_B^2}{R_H}} \cdot \left( \frac{3}{4} \frac{\pi\varphi}{\varphi_0} + \sin \frac{\pi\varphi}{\varphi_0} + \frac{1}{32} \sin \frac{\pi\varphi}{\varphi_0} \right) \frac{z}{l} \\ v_z = 0 \end{cases} \quad (29)$$

Представленные на рис. 1 диаграммы составляющих скоростей  $v_r$  и  $v_\varphi$  в месте изгиба полосы показывают, что наибольшее значение скорости имеют в точках  $a$ ,  $b$  и  $d$ , скорость точки  $O_1$  равна нулю, остальные точки имеют промежуточное значение скорости. Из рис. 1 видно также, что с уменьшением угла подгибки (увеличением радиуса в месте изгиба) скорости движения частиц металла уменьшаются, стремясь к нулю, что качественно подтверждается экспериментами по исследованию деформаций по толщине и ширине мест изгиба гнутых профилей [7].

После определения скорости перемещения частиц металла в месте изгиба, возможно определение компонентов скорости деформаций. Для этого воспользуемся дифференциальными соотношениями между скоростями деформаций и составляющими скорости перемещения частиц, которые в цилиндрической системе координат имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{v_r}{r}; & \varepsilon_{\varphi z} = \frac{\partial v_\varphi}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \varphi} \\ \varepsilon_{zz} = \frac{\partial v_z}{\partial z}; & \varepsilon_{zr} = \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \end{cases} \quad (30)$$

Подставив поле скоростей (29) в (30), после некоторых преобразований получим следующие выражения для компонентов скоростей деформаций:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{rr} &= -\frac{v_0}{R_H - \frac{R_B^2}{R_H}} \left( r - \frac{R_B^2}{r^2} \right) \frac{z}{l} \cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \\ \varepsilon_{\varphi\varphi} &= -\frac{v_0}{R_H - \frac{R_B^2}{R_H}} \left( 1 + \frac{R_B^2}{r^2} \right) \frac{z}{l} \cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \\ \varepsilon_{\varphi\varphi} &= \frac{2\pi}{\varphi_0} \frac{v_0}{R_H - \frac{R_B^2}{R_H}} \left( 1 + \frac{R_B^2}{r^2} \right) \frac{z}{l} \cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \\ \varepsilon_{\varphi z} &= \frac{1}{\pi} \frac{v_0}{R_H - \frac{R_B^2}{R_H}} \frac{r\varphi_0}{l} \left( \frac{3}{4} \frac{\pi\varphi}{\varphi_0} + \sin \frac{\pi\varphi}{\varphi_0} + \frac{1}{8} \sin \frac{2\pi\varphi}{\varphi_0} \right) \\ \varepsilon_{zr} &= -\frac{v_0}{R_H - \frac{R_B^2}{R_H}} \left( 1 - \frac{R_B^2}{r} \right) \frac{\cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0}}{l} \\ \varepsilon_{zz} &= 0 \end{aligned} \quad (31)$$

Из выражений (31) видно, что скорости деформаций в радиальном и тангенциальном направлении по абсолютной величине равны и отличаются только знаком. Это естественно, так как при отсутствии движения частиц вдоль полосы деформация сжатия в радиальном направлении вызывает такую же по величине деформацию, но обратного знака в тангенциальном направлении.

Графики  $\varepsilon_{rr}$  в зависимости от геометрических размеров образцов приведены на рис. 2-10.

Зная компоненты скоростей деформаций, можно определить скорость деформации на площадке, равнонаклоненной к главным осям, т.е. интенсивность скоростей деформаций, по следующей формуле:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{\varphi\varphi})^2 + (\varepsilon_{\varphi\varphi} - \varepsilon_{zz})^2 + (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{rr})^2 + \frac{3}{2}(\varepsilon_{r\varphi}^2 + \varepsilon_{\varphi z}^2 + \varepsilon_{zr}^2)} \quad (32)$$

Подставляя (31) в (32), после преобразований получим:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{v_0}{R_H - \frac{R_B^2}{R_H}} \frac{\cos^3 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0}}{l} \left[ \left( 1 + \frac{R_B^2}{r^2} \right)^2 z^2 \cos^2 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} + \frac{\pi^2}{\varphi_0^2} \left( 1 - \frac{R_B^2}{r^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \times$$

$$\times \left[ z^2 \sin^2 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} + \frac{\varphi_0^2 r^2}{4\pi^2 \cos^6 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0}} \left( \frac{3}{4} \pi \frac{\varphi}{\varphi_0} + \sin \frac{\pi\varphi}{\varphi_0} + \frac{1}{8} \sin \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right)^2 + \frac{1}{4} \left( r - \frac{R_B^2}{r} \right)^2 \cos^2 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (33)$$

Из выражения (33) видно, что интенсивность скоростей деформаций зависит от всех трех координат и переменна по всему объему места изгиба.

На внутреннем и наружном контуре места изгиба максимальное значение , находится на биссектрисе угла изгиба и по мере удаления от нее уменьшается, принимая минимальное значение при  $\varphi = \varphi_0$ .

В сечении  $\varphi = 0$  интенсивность скоростей деформаций возрастает при изменении радиуса-вектора  $r$  от  $R_H$  до  $R_B$ .

Это говорит о том, что нормальные напряжения в этом сечении в растянутой зоне меньше, чем в сжатой. Такое распределение напряжений обусловлено различием напряженно-деформированного состояния в растянутой и сжатой зоне места изгиба под непосредственным воздействием рабочего инструмента, что подтверждается экспериментальными данными исследования относительных деформаций по наружному и внутреннему контурам в местах изгиба гнутых профилей [7].

Чтобы проанализировать напряженное состояние в процессе уменьшения толщины полосы в месте изгиба, необходимо вычислить коэффициент жесткости, который определяется по формуле:

$$\mu_i = \frac{1}{3} \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \quad (34)$$

где  $\sigma_i$  - интенсивность напряжений.

Подставив в формулу (34) выражение (33) для интенсивности скоростей деформаций, получим:

$$\mu_i = \frac{\sigma_i}{2\sqrt{3}} \frac{(R_H - \frac{R_B^2}{R_H})}{v_0 \cos^3 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0}} \left[ \left( 1 + \frac{R_B^2}{r^2} \right)^2 z^2 \cos^2 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} + \frac{\pi^2}{\varphi_0^2} \left( 1 - \frac{R_B^2}{r^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \times$$

$$\times \left[ z^2 \sin^2 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} + \frac{\varphi_0^2 r^2}{4\pi^2 \cos^6 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0}} \left( \frac{3}{4} \pi \frac{\varphi}{\varphi_0} + \sin \frac{\pi\varphi}{\varphi_0} + \frac{1}{8} \sin \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right)^2 + \frac{1}{4} \left( r - \frac{R_B^2}{r} \right)^2 \cos^2 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (35)$$

Определив коэффициент жесткости (35) и используя зависимости между напряжениями и скоростями деформаций для процесса пластического формоизменения при условии постоянства объема, можно определить касательные напряжения, возникающие за счет уменьшения толщины в местах изгиба профиля, по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \tau_{r\varphi} &= \mu_i \tau_{r\varphi} \\ \tau_{\varphi z} &= \mu_i \tau_{\varphi z} \\ \tau_{rz} &= \mu_i \tau_{rz} \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

Используя выражения (35) и (36), найдем:

$$\begin{aligned}
v_{\varphi} = & \frac{\pi}{\sqrt{3}\varphi_0} v_i z \left(1 - \frac{R_B^2}{r^2}\right)^2 \sin \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \times \\
& \times \left[ \left(1 + \frac{R_B^2}{r^2}\right)^2 z^2 \cos^2 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} + \frac{\pi^2}{\varphi_0^2} \left(1 - \frac{R_B^2}{r^2}\right)^2 \times \right. \\
& \times \left. z^2 \sin^2 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} + \frac{\varphi_0^2 r^2}{4\pi^2 \cos^6 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0}} \left( \frac{3}{4} \pi \frac{\varphi}{\varphi_0} + \sin \frac{\pi\varphi}{\varphi_0} + \frac{1}{8} \sin \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right)^2 + \frac{1}{4} \left( r - \frac{R_B^2}{r} \right)^2 \cos^2 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^{\frac{1}{2}} \\
v_{\varphi z} = & \frac{2}{\pi\sqrt{3}} \frac{\sigma_i \varphi_0 r}{\cos^3 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0}} \times \\
& \times \left[ \left(1 + \frac{R_B^2}{r^2}\right)^2 z^2 \cos^2 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} + \frac{\pi^2}{\varphi_0^2} \left(1 - \frac{R_B^2}{r^2}\right)^2 \times \right. \\
& \times \left. z^2 \sin^2 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} + \frac{\varphi_0^2 r^2}{4\pi^2 \cos^6 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0}} \left( \frac{3}{4} \pi \frac{\varphi}{\varphi_0} + \sin \frac{\pi\varphi}{\varphi_0} + \frac{1}{8} \sin \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right)^2 + \frac{1}{4} \left( r - \frac{R_B^2}{r} \right)^2 \cos^2 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^{\frac{1}{2}} \\
v_z = & \frac{\sigma_i}{2\sqrt{3}} v_i z \left(1 - \frac{R_B^2}{r^2}\right)^2 \cos \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \times \\
& \times \left[ \left(1 + \frac{R_B^2}{r^2}\right)^2 z^2 \cos^2 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} + \frac{\pi^2}{\varphi_0^2} \left(1 - \frac{R_B^2}{r^2}\right)^2 \times \right. \\
& \times \left. z^2 \sin^2 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} + \frac{\varphi_0^2 r^2}{4\pi^2 \cos^6 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0}} \left( \frac{3}{4} \pi \frac{\varphi}{\varphi_0} + \sin \frac{\pi\varphi}{\varphi_0} + \frac{1}{8} \sin \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right)^2 + \frac{1}{4} \left( r - \frac{R_B^2}{r} \right)^2 \cos^2 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^{\frac{1}{2}}
\end{aligned} \tag{37}$$

Для определения значений касательных напряжений по формулам (37) необходимо знать выражения для интенсивности напряжений  $\sigma_i$ ; для упрочняющегося материала  $\sigma_i$  выражается степенной зависимостью следующего вида:

$$\sigma_i = K e_i^m \tag{38}$$

где  $K$  и  $m$  - константы для данного материала, характеризующие физико-механические свойства и определяемые экспериментально при испытаниях на растяжение - сжатие;

$e_i$  - интенсивность деформаций, определяемая по зависимости:

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_{rr} - e_{\varphi\varphi})^2 + (e_{\varphi\varphi} - e_{zz})^2 + (e_{zz} - e_{rr})^2 + \frac{3}{2}(e_{r\varphi}^2 + e_{\varphi z}^2 + e_{rz}^2)} \tag{39}$$

где  $e_{rr}, e_{\varphi\varphi}, e_{zz}, e_{r\varphi}, e_{\varphi z}, e_{rz}$  - компоненты деформаций.

Для идеально-пластичного материала

$$\sigma_i = \sigma_s \tag{40}$$

Таким образом получено поле скоростей движения частиц металла (29) и компоненты скоростей деформаций (31), зная которые можно установить степень влияния утонения на величину нормальных и касательных напряжений и на величину деформаций в местах изгиба.

Используемый метод анализа позволяет принимать скорости движения частиц тождественно равными перемещениям, происходящим в единицу времени; знание поля скоростей перемещений позволяет определить величину приращения заготовки в процессе формоизменения ее в валках профилегибочного стана.

Из поля скоростей перемещений частиц металла в месте изгиба (29) следует, что радиальная деформация вызывает течение металла на такую же величину в тангенциальном направлении. Площадь, заключенная между наружной поверхностью

места изгиба в деформированном и недеформированном состояниях, будет определять приращение ширины исходной заготовки при ее формоизменении.

Эту площадь можно определить следующим образом:

$$F = \int_{\varphi_0}^0 v_r R_H d\varphi \quad (41)$$

где  $v_r$  - радиальная составляющая скорости;

$R_H d\varphi$  - длина элемента дуги на наружной поверхности места изгиба.

Подставив выражение радиальной составляющей скорости из (29) при  $r = R_H$  в (41) и проинтегрировав, получим:

$$F = \frac{3}{4} v_0 R_H \varphi_0 \frac{z}{l} \quad (42)$$

Для готового профиля (т.е. при  $\frac{z}{l} = 1$ ) имеем:

$$F = \frac{3}{4} v_0 R_H \varphi_0 \quad (43)$$

Величина приращения ширины заготовки определяется выражением:

$$\Delta b = \frac{F}{s_0} \quad (44)$$

где  $s_0$  - толщина полосы, мм.

С учетом (43) выражение (44) примет вид:

$$\Delta b = \frac{3}{4} v_0 \frac{R_H \varphi_0}{s_0} \quad (45)$$

где  $R_H$  - наружный радиус в месте изгиба, мм;

$\varphi_0 = \frac{\alpha}{2}$  - половина угла подгибки элемента профиля, принятого по калибровке, рад;

$v_0 = \frac{\Delta s_{\max}}{s_0}$  - величина максимального утонения в месте изгиба, мм;

$s_0$  - толщина полосы, мм.

Подставив в выражение (45) значение  $\varphi_0$  и  $v_0$ , получим формулу для определения величины приращения ширины заготовки:

$$\Delta b = \frac{3}{8} \frac{\Delta s_{\max}}{s_0} R_H \alpha \quad (46)$$

Таким образом, на основании исследования процесса утонения в местах изгиба получена формула для определения величины приращения ширины заготовки.

Численная реализация полученных математических моделей производилась на ПК с использованием прикладных программных продуктов «Microsoft Excel 2007» и «Mathcad 13».

Результаты численной реализации представлены на рис. 2 – 10.

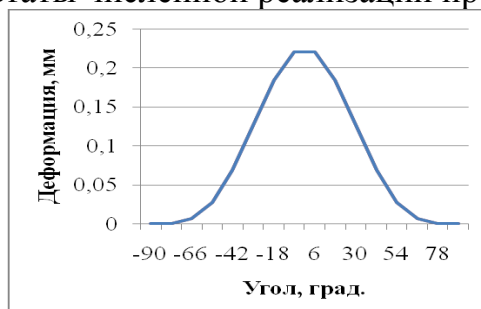


Рис. 2. Результаты расчета для  $s=1$  и  $h=s$

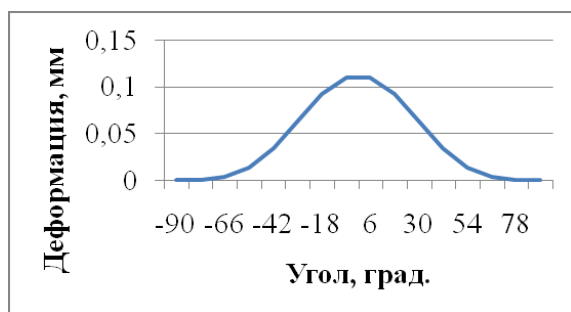


Рис. 4. Результаты расчета для  $s=1$  и

$h=3s$

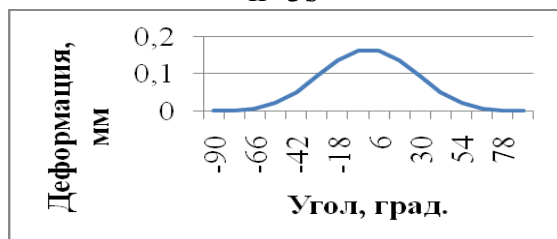


Рис. 6. Результаты расчета для  $s=1,5$  и

$h=2s$

Рис. 3. Результаты расчета для  $s=1$  и  $h=2s$

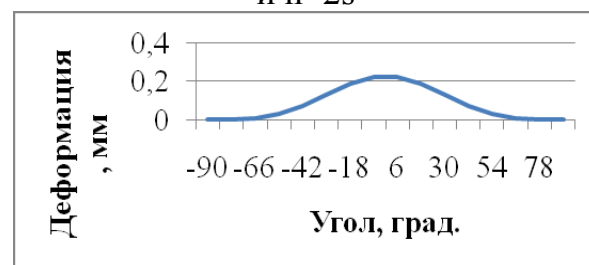


Рис. 5. Результаты расчета для

$s=1,5$  и  $h=s$

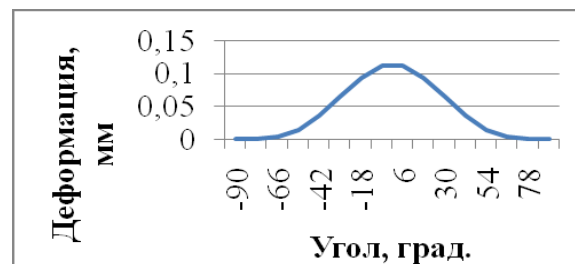


Рис. 7. Результаты расчета для

$s=1,5$  и  $h=3s$

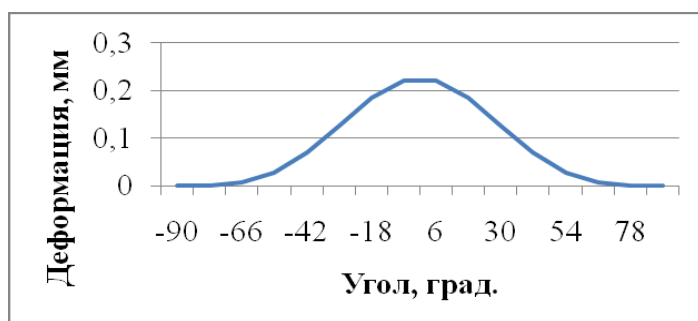


Рис. 8. Результаты расчета для  $s=2,4$  и

$h=s$

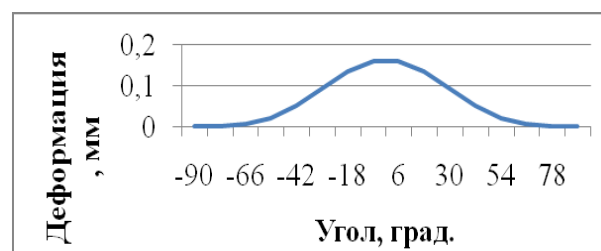


Рис. 9. Результаты расчета для

$s=2,4$  и  $h=2s$

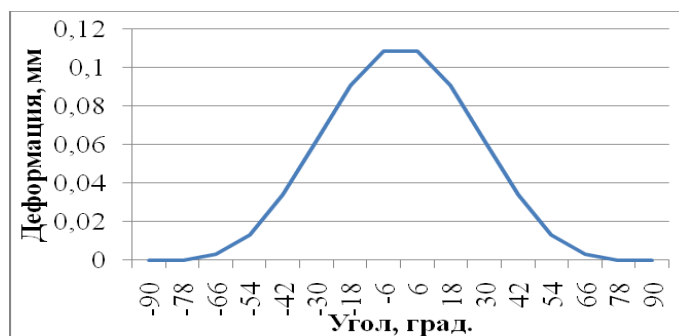


Рис. 10. Результаты расчета для  $s=2,4$  и  $h=3s$

## Выводы

1. В работе для анализа напряженно-деформированного состояния металла при валковой формовке профилей с местами изгиба на  $180^\circ$  и определения параметров,

характеризующих процесс, использован метод механики сплошных сред с описанием очага деформации полем скоростей перемещений. Метод, предполагает использование уравнений механики сплошных сред в их наиболее общей форме, то есть в виде уравнений движения вязкой жидкости, а также специальных характеристик, позволяющих учитывать отличия в деформировании твердых металлов от течения вязких жидкостей.

2. В качестве основного материала при изготовлении специальных профилей с местами изгиба на  $180^\circ$  применяют сталь Ст.3, сталь 08кп с защитно-декоративными покрытиями (поливинилхлоридная пленка; лакокрасочное покрытие; цинк, алюминий или их сплавы). Относительное удлинение материалов покрытий на (15...100)% больше значений относительного удлинения стали, поэтому для оценки возможности радиального растяжения при изгибе выполнен анализ напряженно-деформированного состояния основного металла.

3. На основании исследования распределения утонения в местах изгиба полосы при ее формоизменении получены поле скоростей движения частиц металла (29) и компоненты скоростей деформации (31) для установления степени влияния утонения на величину нормальных и касательных напряжений и деформаций в местах изгиба.

**Список литературы:** 1. Гун Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением. Учебное пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1983. – 285 с. 2. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. 3-е изд. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 285 с. 3. Седов Л.И. Механика сплошной среды: В 2 т. т. 1 – 4-е изд. – М.: Наука, 1983. – 540 с. 4. Седов Л.И. Механика сплошной среды: В 2 т. т.2 – 4-е изд. – М.: Наука, 1983. – 585 с. 5. Алексеев Ю.Н. Вопросы пластического течения металлов.– Харьков: изд-во ХГУ, 1958. – 188 с. 6. Алексеев Ю.Н. Введение в теорию обработки металлов давлением, прокаткой и резанием.– Харьков: изд-во ХГУ, 1969. – 107 с. 7. Тришевский О.И. Исследование деформированного состояния металла на участке его изгиба на  $180^\circ$  // Тришевский О.И., Плеснецов С.Ю. / Международная научно-техническая конференция «Университетская наука 2009»: сб. тезисов докладов в 2-х томах. - Мариуполь: ПГТУ, 2009 г- 433 С.

УДК 539.374.001.8.621.7 – 111

**ЧИГИРИНСКИЙ В.В.**, докт. техн. наук, проф., ЗНТУ, г. Запорожье  
**АНДРЮЩЕНКО С.А.**, инженер, г. Запорожье  
**КОРНИЕНКО В.В.**, инженер, г. Запорожье.

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ЗАГОТОВКИ В УСЛОВИЯХ РЕАЛЬНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ**

Разработана математическая модель процесса пластического формоизменения с использованием замкнутого решения теории пластичности. Показанное влияние химического состава, деформационных, скоростных параметров процесса и температуры на напряженное состояние в процессе деформирования металла.

Ключевые слова: математическая модель, теория пластичности, напряженное состояние.

Розроблено математичну модель процесу пластичної формозміни з використанням замкнутого рішення теорії пластичності. Показаний вплив хімічного складу, деформаційних, швидкісних параметрів процесу й температури на напружений стан у процесі деформування металу. Ключові слова: Математична модель, теорія пластичності, напружений стан.

The mathematical model of process of plastic deformation with use of the closed decision of the theory of plasticity is developed. The shown influence of a chemical compound, deformation, high-speed parameters of process and temperature on an intense camp in the course of metal deformation. Key words: mathematical model theory of plasticity, an intense camp in the course.

## 1. Введение.

При изучении напряженного состояния пластической среды часто ограничиваются определением безразмерных значений напряженного состояния, например отношением нормального напряжения к пределу текучести [1]...[3]. В настоящее время используются методы определения среднего предела текучести в зоне деформирования [4], [5]. На основании экспериментальных данных, получены зависимости предела текучести от химического состава, степени, скорости деформации, температуры.

В работах [6]...[8] определена аналитически математическая модель пластической среды с использованием замкнутого решения плоской задачи теории пластичности. Показано, что поля напряжений, деформаций, скоростей деформаций и температур описываются одними координатными функциями. Появляется возможность решить задачу с учетом указанных выше факторов в каждой точке очага формоизменения.

## 2. Постановка задачи.

Система уравнений теории пластичности [6]

уравнения равновесия

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0; \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0; \quad (1)$$

условие пластичности

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4 \cdot \tau_{xy}^2 = 4 \cdot k^2; \quad (2)$$

уравнения связи для скоростей деформаций и деформаций

$$\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2 \cdot \tau_{xy}} = \frac{\xi_x - \xi_y}{\gamma'_{xy}} = F_1; \quad \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2 \cdot \tau_{xy}} = \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{\gamma_{xy}} = F_2; \quad (3)$$

уравнения несжимаемости для скоростей деформаций и деформаций

$$\xi_x + \xi_y = 0; \varepsilon_x + \varepsilon_y = 0; \quad (4)$$

уравнения неразрывности скоростей деформаций и деформаций

$$\frac{\partial^2 \xi_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma'_{xy}}{\partial y \partial x}; \quad \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial y \partial x}; \quad (5)$$

уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right). \quad (6)$$

Граничные условия для напряжений [7]

$$\tau_n = -k \cdot \sin[A\Phi - 2 \cdot \alpha] \text{ или } \tau_n = \left( \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cdot \sin 2 \cdot \alpha - \tau_{xy} \cdot \cos 2 \cdot \alpha \right) \quad (7)$$

### 3. Решение задачи.

Используя уравнения (1),(2) после дифференцирования и преобразований получим обобщенное уравнение равновесия в виде [3]

$$\frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial y^2} = 2 \cdot \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \sqrt{k^2 - \tau_{xy}^2}. \quad (8)$$

Условие (7) определяет зависимость

$$\tau_{\phi\phi} = k \cdot \sin A\Phi. \quad (9)$$

Для сложной пластической среды задача решается с учетом подстановки

$$k = C_\sigma \cdot (H_i)^{m1} \cdot (\Gamma_i)^{m2} \cdot (T)^{m3} \cdot \exp \theta'_4 \quad (10)$$

Выражение (10) может быть составной частью решения (8), если его привести к виду, используя фундаментальную подстановку

$$k = C_\sigma \cdot \exp \theta'_1 \cdot \exp \theta'_2 \cdot \exp \theta'_3 \cdot \exp \theta'_4 = C_\sigma \cdot \exp \theta', \quad (11)$$

$$\text{где } \theta' = \theta'_1 + \theta'_2 + \theta'_3 + \theta'_4, \quad \theta'_1 = -A_1\theta, \quad \theta'_2 = -A_2\theta, \quad \theta'_3 = -A_3\theta,$$

$$\theta'_4 = -A_4\theta \quad \text{или} \quad \theta' = (A_1 + A_2 + A_3 + A_4) \cdot \theta = A \cdot \theta$$

Сумма экспонент определяется тем, что производная сложной функции представляется в виде суммы производных зависимых величин. После подстановки в обобщенное уравнение равновесие [9], получим

$$\left\{ \theta'_{xx} + (\theta'_x + A\Phi_y)^2 - \theta'_{yy} - (\theta'_y - A\Phi_x)^2 + 2A\Phi_{xy} \right\} \cdot \sin(A\Phi) + \\ \left\{ 2(\theta'_x + A\Phi_y)(A\Phi_x - \theta'_y) + A\Phi_{xx} - A\Phi_{yy} - 2\theta'_{xy} \right\} \cdot \cos(A\Phi) = 0, \quad (12)$$

где  $\theta'_x, \theta'_y, \theta'_{xy}$  - производные от суммарного показателя экспоненты по координатам  $x, y$  и смешанная производная  $xy$ ;

$\theta'_1, \theta'_2, \theta'_3, \theta'_4$  - составляющие показателя экспоненты  $\theta'$ , учитывающие влияние скорости, степени деформации, температуры, контактного трения и фактора формы.

Для тождественного удовлетворения уравнения (12) должно выполняться условие  $\theta'_x = -A\Phi_y, \theta'_y = A\Phi_x$ .

Используя (3)...(5), в работах [9],[10] приведено решение деформационной задачи. Показано, что в составляющих тензоров напряжений, скоростей деформаций, деформаций и температур присутствуют одинаковые координатные функции  $\theta$  и  $\Phi$ . В этом случае имеем

$$\xi_x = -\xi_y = C_\xi \cdot \exp \theta''_1 \cdot \cos B_1\Phi = C_\xi \cdot \exp(-B_1\theta) \cdot \cos B_1\Phi, \\ \gamma'_{xy} = C_\xi \cdot \exp \theta''_1 \cdot \sin B_1\Phi = C_\xi \cdot \exp(-B_1\theta) \cdot \sin B_1\Phi, \quad (13)$$

$$H_i = 2 \cdot C_\xi \cdot \exp \theta''_1 = 2 \cdot C_\xi \cdot \exp(-B_1\theta),$$

$$\varepsilon_x = -\varepsilon_y = C_\varepsilon \cdot \exp \theta''_2 \cdot \cos B_2\Phi = C_\varepsilon \cdot \exp(-B_2\theta) \cdot \cos B_2\Phi,$$

$$\gamma_{xy} = C_{\varepsilon} \cdot \exp \theta_2'' \cdot \sin B_2 \Phi = C_{\varepsilon} \cdot \exp(-B_2 \theta) \cdot \sin B_2 \Phi, \quad (14)$$

$$\tilde{A}_i = 2 \cdot C_{\varepsilon} \cdot \exp \theta_2'' = 2 \cdot C_{\varepsilon} \cdot \exp(-B_2 \theta),$$

где  $\xi_x, \xi_y, \gamma_{xy}$  и  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$  - линейные и сдвиговые составляющие тензоров скоростей деформаций и деформаций;

$B_1, B_2$  - постоянные, характеризующие скоростной и деформационный параметры в полях скоростей деформаций и деформаций;

$\theta_1'', \theta_2''$  - показатели экспоненты, зависящие от координат очага деформации, характеризующие распределение скорости деформации и деформации в зоне течения;

$C_{\xi}, C_{\varepsilon}$  - постоянные, определяемые граничными и очевидными условиями очага деформации для скоростных и деформационных параметров;

$H_i, \tilde{A}_i$  - интенсивности скорости и степени деформации сдвига.

Из решений задачи следует [9],[10], что показатели экспонент

$$\theta_1'' = -B_1 \theta. \quad \theta_2'' = -B_2 \theta.$$

Используя уравнение теплопроводности, для стационарной температурной задачи (6) имеет решение в виде [8]

$$T = \exp(\theta_3'') \cdot (C_T' \cdot \sin B_3 \Phi + C_T'' \cdot \cos B_3 \Phi), \quad (15)$$

где  $\theta_3''$  - показатель экспоненты, зависящий от координат очага деформации, характеризующий распределение температуры по зоне течения;  $B_3$  - постоянная, характеризующая температурный фактор в очаге деформации.

Для температурной задачи  $\theta_3'' = -B_3 \theta$ . Это позволяет деформационные параметры и температуру математически выразить через единую функцию. Таким образом,

$$\exp(-\theta) = \left( \frac{H_i}{2 \cdot C_{\xi}} \right)^{\frac{1}{B_1}} = \left( \frac{\tilde{A}_i}{2 \cdot C_{\varepsilon}} \right)^{\frac{1}{B_2}} = \left( \frac{T}{(C_T' \sin B_3 \Phi + C_T'' \cos B_3 \Phi)} \right)^{\frac{1}{B_3}}.$$

Подставляя  $\exp(-\theta)$  в выражение (11) для сопротивления деформации  $k$ , получим после упрощений

$$k = C_{\sigma} \cdot (H_i)^{\frac{A_1'}{B_1}} (\tilde{A}_i)^{\frac{A_2'}{B_2}} (T')^{\frac{A_3'}{B_3}} \cdot \exp \theta_4',$$

где  $C_{\sigma}$  - постоянная величина, куда вошли значения  $C_{\xi}, C_{\varepsilon}$ . При этом

$$T' = \frac{T}{(C_T' \sin B_3 \Phi + C_T'' \cos B_3 \Phi)}.$$

Принимая  $m_1 = \frac{A_1'}{B_1}, m_2 = \frac{A_2'}{B_2}, m_3 = \frac{A_3'}{B_3}$ , имеем

$$k = C_{\sigma} \cdot (H_i)^{m_1} (\tilde{A}_i)^{m_2} (T')^{m_3} \cdot \exp \theta_4'.$$

Выражение получено аналитически и фактически совпадает с (10). Значения  $H_i$ ,  $\Gamma_i$ ,  $T$  входящие в (10) принимаются для каждой точки очага деформации и являются переменными величинами. В литературе известны аналогичные модели, но полученные на основании экспериментальных исследований в условиях однородного напряженного и деформированного состояний [4]. Для разных марок стали предел текучести  $\sigma_0$  в зависимости от интегральных параметров: скорости деформации  $U$ , степени деформации  $\varepsilon$ , температуры  $T$ , имеет вид

$$\sigma_0 = S \cdot \sigma_o \cdot U^a \cdot (10 \cdot \varepsilon)^b \cdot \left( \frac{T_o}{1000} \right)^c. \quad (16)$$

где  $\sigma_o$  - базовое напряжение текучести для конкретной марки стали;  $S$  - поправочный коэффициент;  $U$  - среднее значение скорости деформации;  $\varepsilon$  - среднее значение относительной деформации;  $T_o$  - среднее значение температуры в очаге деформации.

Анализ показывает, что выражение (10) можно упростить, если принять напряженное и деформированное состояние однородным. Это имеет место при отсутствии контактного трения. В этом случае, при подстановке в (10) значений из (13)...(15) и  $C'_T = 0$  с учетом  $A\Phi = \theta' = 0$ , получим

$$k = C_\sigma \cdot (2 \cdot C_{\sigma 1} \cdot C_\xi)^{m_1} \cdot (2 \cdot C_{\sigma 2} \cdot C_\varepsilon)^{m_2} \cdot (C_{\sigma 3} \cdot C''_T)^{m_3}. \quad (17)$$

$$\text{Из граничных условий можно получить } C_\sigma = \frac{k_o}{\exp \theta_o \cdot \cos A\Phi_o},$$

где  $k_o$  - сопротивление сдвига на контакте в крайней точке очага деформации;  $\theta_o, A\Phi_o$  - значения функций  $\theta$  и  $A\Phi$  в крайних точках очага деформации. Выражение (17) структурно аналогично (16). Следовательно

$$k_o = \frac{S \cdot \sigma_o}{\sqrt{3}}, \quad 2 \cdot C_{\sigma 1} \cdot C_\xi = U, \quad 2 \cdot C_{\sigma 2} \cdot C_\varepsilon = 10\varepsilon, \quad C_{\sigma 3} \cdot C''_T = \frac{T_o}{1000}$$

$$m_1 = a, \quad m_2 = b, \quad m_3 = c.$$

Следует подчеркнуть, что  $U, \varepsilon, T_o$  средние величины по очагу деформации. Определение постоянных величин  $C_\xi, C_\varepsilon, C''_T$  можно уточнить. Действительно, среднее значение интенсивности скорости деформации сдвига в зоне течения. Выражение (16) в данном случае используется, как своеобразное граничное условие для определения постоянных значений в (10). Величина  $k$ , с учетом всех изменений принимает вид

$$k = \frac{S \cdot \sigma_o}{\sqrt{3} \cdot \exp \theta_o \cdot \cos A\Phi_o} \cdot (U \cdot \alpha_\xi)^a \cdot (10 \cdot \varepsilon \cdot \alpha_\varepsilon)^b \cdot \left( \frac{T}{1000} \cdot \alpha_T \right)^c \cdot \exp \theta'_4, \quad (18)$$

$$\text{где } \alpha_\xi = \frac{\exp(-\theta''_1)}{I_1}, \quad \alpha_\varepsilon = \frac{\exp(-\theta''_2)}{I_2}, \quad \alpha_T = \frac{\exp(-\theta''_3)}{I_3}.$$

Используя выражение (18) и (9), из уравнений равновесия можно получить формулы для определения нормальных напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ , действительно :

$$\begin{aligned}\sigma_x &= k' \cdot \exp \theta_4' \cdot \cos(A\Phi) + \sigma_0 + f(y) + C, \\ \sigma_y &= -k' \cdot \exp \theta_4' \cdot \cos(A\Phi) + \sigma_0 + f(x) + C, \\ \tau_{\delta\delta} &= k' \cdot \exp \theta_4' \cdot \sin A\Phi,\end{aligned}\quad (19)$$

$$\text{где } k' = \frac{S \cdot \sigma_0}{\sqrt{3} \cdot \exp \theta_0 \cdot \cos A\Phi_0} \cdot (U \cdot \alpha_\xi)^a \cdot (10 \cdot \varepsilon \cdot \alpha_\varepsilon)^b \cdot \left( \frac{T}{1000} \cdot \alpha_T \right)^c,$$

$$\text{при этом } \theta_x' = -A\Phi_y, \theta_y' = A\Phi_x.$$

Значение  $k'$  является переменной величиной и при коэффициенте трения  $f=0$ ,  $\alpha_\xi = \alpha_\varepsilon = \alpha_T = 1$ ,  $\exp \theta_0 = 1$ ,  $\cos A\Phi_0 = 1$ ,  $k'$  практически определяется формулой Андреюка-Тюленева (16). Следует отметить, что соотношения Коши-Римана определяют тип функций  $\theta$  и  $A\Phi$ , которые являются гармоническими, удовлетворяющие уравнению Лапласа. В этом случае имеем

$$A\Phi = AA_6 \cdot x \cdot y. \quad \theta' = -\frac{l}{2} \cdot AA_6 (x^2 - y^2) \quad (20)$$

Используя выражения (18)...(20) были подсчитаны напряжения при разных значениях коэффициента трения, фактора формы, степени, скорости деформации, температуры для разных марок стали.

Из рис.1 видно, что решение реагирует на коэффициент трения и фактор формы, как для нормальных, так и касательных напряжений, плавно переходящих через ноль в области нейтральной оси на контакте.

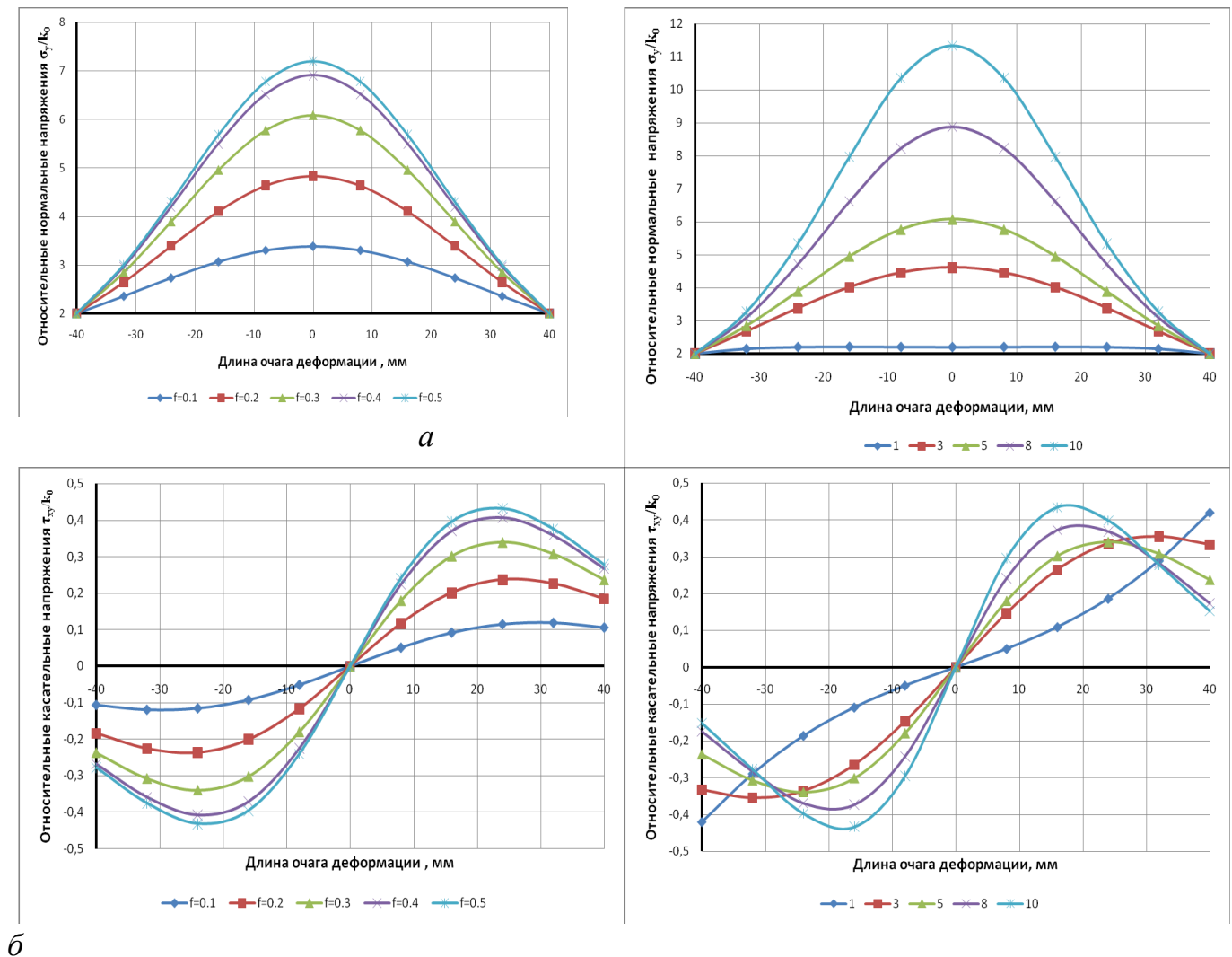
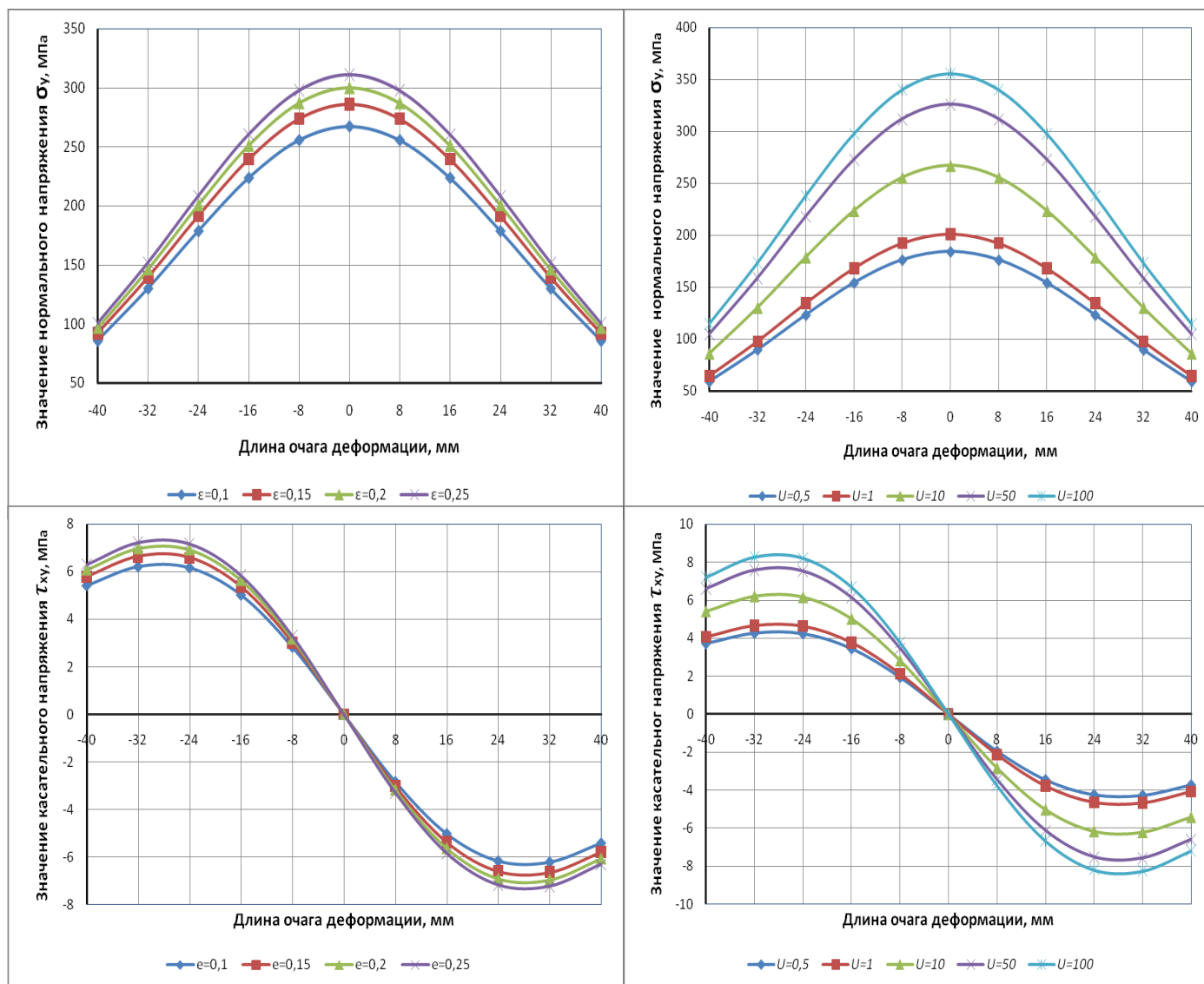


Рис.1 Распределение нормальных и касательных напряжений на контакте в зависимости от : а) коэффициента трения при  $l/h = 5$   $f = 0.1...0.5$   
 б) фактора формы  $l/h = 1,3,5,8,10$  при  $f = 0.3$

На рис.2а показано распределение напряжений при различной степени деформации для стали 3 сп. Анализ показывает, что марка стали и величина обжатия  $\varepsilon$  изменяют характер распределения напряжений в зоне течения металла.

Для той же марки стали получено распределение напряжений на контакте при разных скоростях деформации, рис.2б. Как и для деформаций, распределение напряжений в очаге деформации во многом определяется скоростными параметрами процесса.



а

б

Рис.2 Распределение нормальных и касательных напряжений на контакте в зависимости от : а). степени деформации при  $f = 0.3$ ,  $l/h = 5$ ,  $U =$ ,  $T = 1000^{\circ}C$

б). скорости деформации  $U$  при  $f = 0.3$ ,  $l/h = 5$ ,  $\epsilon =$ ,  $T = 1000^{\circ}C$

При горячей обработке температурный фактор во многом является определяющим, в значительной степени он характеризует распределение напряжений в объеме деформируемого материала, рис.3а. Разные марки стали представлены на рис.3б. Расчеты приведены для осадки на шероховатых плитах. Предложенный метод решения задач справедлив для любого способа обработки металлов давлением. Отличие заключается в граничных условиях.

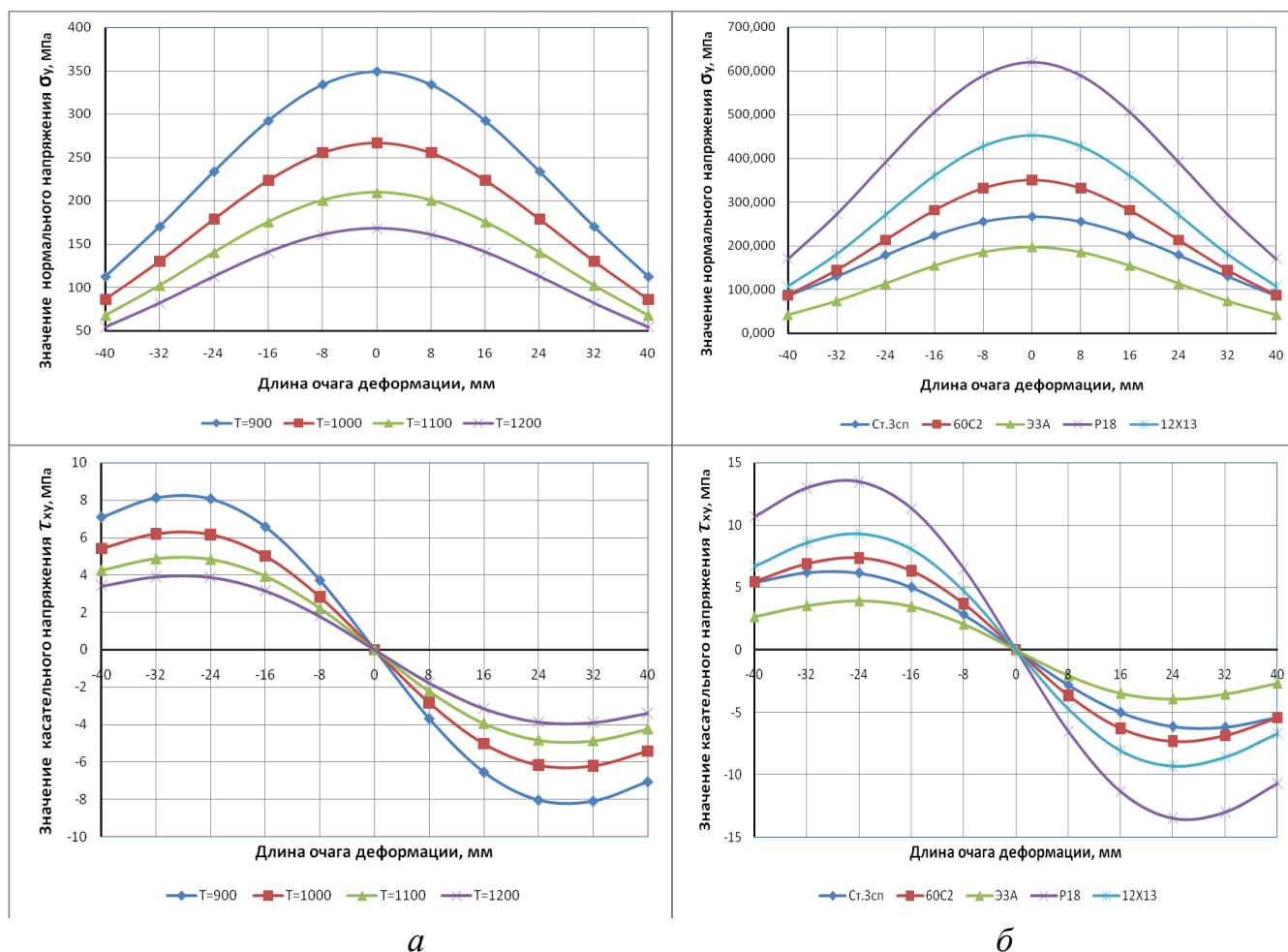


Рис.3 Распределение нормальных и касательных напряжений на контакте: а).при  $f = 0.3$ ,  $l/h = 5$ ,  $U =$ ,  $\varepsilon = 0.1$  б). для разных марок стали при  $f = 0.3, l/h = 5, \varepsilon = 0.1, U = 10c^{-1}, T = 1000^{\circ}C$

Выводы: Представленные решения позволяют сделать ряд следующих выводов:

1. На базе решения замкнутой задачи теории пластичности, аналитически получена модель сложной пластической среды, которая подтверждается экспериментальными данными других авторов.
2. Сопоставление аналитической и экспериментальной моделей позволило перейти от усредненного значения предела текучести в зоне течения к его распределению, отсюда распределению компонентов напряжений для реальной пластической среды.
3. Полученные выражения качественно и количественно верно отражают влияние большого количества факторов процесса на напряженное состояние реальной пластической среды.

**Список литературы:** 1. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением.-М.: Металлургия, 1978.- 359 с. 2. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением.-М.: Машиностроение, 1977.- 422 с. 3. Смирнов В.С. Теория прокатки.- М.:Металлургия, 1967.- 460 с. 4. Андреюк Л.В., Тюленев Г.П. // Сталь.-1972.-9.-С. 825...828. 5. Соколов Л.Д. Влияние разности температур по сечению полосы на неравномерность деформации // Сталь.-1947.-№10.-С.51...53. 6. Чигиринский В.В. Некоторые особенности теории пластичности применительно к процессам ОМД// Тр.науч.-техн. конф. «Теория и технология процессов пластической деформации-96».- М.: МИСиС, 1997.- С.568-572. 7. V.V. Chygyrny'skyu, I. Mamuzic, F.Vodopivec,I.V. Gordienro. The Influence of the Temperature Factor on Deformability of the

Plastic Medium // Metalurgija. Zagreb.- 2006.-vol.45, br.2.-P.115-118. 8.Чигиринский В.В. Исследование влияния пространственных параметров деформированного объема на сопротивление пластической деформации сдвига// Теория и практика металлургии.-1997.- № 3.-С.31-32. 10. Чигиринский В.В. Аналитическое определение напряжений и скоростей деформаций реального очага деформации применительно к процессам обработки металлов давлением// Збірник наук.праць «Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій».- Днепропетровск: Навчальна книга, 1998, Т.3.- С.130-145. 11. Чигиринский В.В., Гордиенко В.И. Деформационная модель пластической среды с учетом температурного фактора // Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт» (Машиностроение). - 2002.- № 43.- С. 11-13.

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                          |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b><i>В.О. ЄВСТРАТОВ</i></b>                                                                                                             | <b>3</b>  |
| <b>ПЕРЕДМОВА ПРО ІСТОРІЮ ДІЯЛЬНОСТІ КАФЕДРИ<br/>ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ</b>                                                               |           |
| <b>ПРОКАТКА</b>                                                                                                                          | <b>22</b> |
| <b>АНАЛИЗ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОКАТНОГО<br/>ОБОРУДОВАНИЯ</b>                                                                            | <b>22</b> |
| <b><i>АХЛЕСТИН А. В.</i></b>                                                                                                             | <b>22</b> |
| <b>ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕПРИ-<br/>ВОДНОГО ИНСТРУМЕНТА В ПРОЦЕССАХ ВАЛ-<br/>КОВОЙ ФОРМОВКИ</b>                                    |           |
| <b><i>ЖУЧКОВ С.М., ТОКМАКОВ П.В., ЛЕЩЕНКО А.И.</i></b>                                                                                   | <b>27</b> |
| <b>ПРИМЕНЕНИЕ ТРЕХОЧАГОВЫХ ПРОКАТНЫХ<br/>МОДУЛЕЙ – ПЕРСПЕКТИВНОЕ РЕШЕНИЕ В РАЗ-<br/>ВИТИИ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОЙ СОРТОВОЙ<br/>ПРОКАТКИ</b> |           |
| <b><i>ПУЗЫРЬ Р.Г., ДРАГОБЕЦКИЙ В.В., МОСЬПАН Д.В.</i></b>                                                                                | <b>33</b> |
| <b><i>КОНДРАТЮК С.А.</i></b>                                                                                                             |           |
| <b>НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ТРАНСФОРМИРУЕМОГО<br/>ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОФИЛИРОВАНИЯ ОБО-<br/>ДЬЕВ КОЛЕС</b>                                         |           |
| <b><i>БИЛЛЕР В.В., ПОПОВ А.В.</i></b>                                                                                                    | <b>40</b> |
| <b>СОЗДАНИЕ ПЕРВОГО В УКРАИНЕ БАЛОЧНОГО<br/>СТАНА</b>                                                                                    |           |
| <b><i>В.С. АРИХ, В.Ю. КУЛАК</i></b>                                                                                                      | <b>46</b> |
| <b>РАЗВИТИЕ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА С<br/>ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ<br/>ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ</b>                                |           |

|                                                                                                                                                                                                                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА</b>                                                                                                                                                                                     | <b>51</b> |
| <i>НИКОЛАЕВ В.А., ВАСИЛЬЕВ А.Г., ВАСИЛЬЕВ А.А.</i><br><b>ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ-ВОЛОЧЕНИЯ ТОНКИХ ПОЛОС</b>                                                                                                                                       | <b>51</b> |
| <i>ЖУЧКОВ С. М., БАРЫШЕВ Е.В., ЛОХМАТОВ А.П., СИКАЧИНА И.В., КЛЮЧНИКОВ К.Ю., ГАЛЕНКО Ю.С., БАРЫШЕВА Л.П.</i><br><b>ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ МЕТАЛЛА К ХОЛОДНОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ПРОФИЛИ ПРОСТЫХ И СЛОЖНЫХ СЕЧЕНИЙ В УСЛОВИЯХ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПРОИЗВОДСТВ.</b> | <b>57</b> |
| <i>ТРИШЕВСКИЙ О.И., ГОНЧАРЕНКО Е.А., ПАЧКАЕВ Д.П.</i><br><b>НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБЛЕГЧЁННЫХ ПРОФИЛЕЙ ДЛЯ ТЕПЛООБМЕННИКОВ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИХ ПРОМЫШЛЕННОМУ ПРОИЗВОДСТВУ</b>                                                                    | <b>61</b> |
| <i>ЧУМАКОВ В.П., КОРЕНКО М.Г., СТАРОСТА Н.В.</i><br><b>ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ТОРЦОВ БЛЮМОВ ПРИ ПРОКАТКЕ НА ЗАГОТОВОЧНЫХ СТАНАХ</b>                                                                                                                  | <b>69</b> |
| <i>ЧУМАКОВ В.П., КОРЕНКО М.Г.</i><br><b>К ВОПРОСУ ВЫБОРА ФОРМЫ ДОННОЙ ЧАСТИ УШИРЕННОГО КНИЗУ СЛИТКА</b>                                                                                                                                                   | <b>72</b> |
| <i>МЕДВЕДЕВ В.С.</i><br><b>РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ СОЗДАНИЯ БАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭКОНОМИЧНЫХ ФАСОННЫХ ПРОФИЛЕЙ ПРОКАТА</b>                                                                                                                  | <b>77</b> |

|                                                                                                                                                                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ<br/>ПРОЦЕССОВ ФОРМОВКИ В ВАЛКАХ</b>                                                                                                                                                                        | 84  |
| <i>МАКСИМЕНКО О.П., РОМАНЮК Р.Я.</i><br><b>МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРОДОЛЬНОЙ УСТОЙЧИ-<br/>ВОСТИ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ</b>                                                                                                                                     | 84  |
| <i>СЕРЕДА Б.П., КОВАЛЕНКО А.К.</i>                                                                                                                                                                                                                 | 90  |
| <b>МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИ-<br/>РОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НА БОКОВОЙ ПО-<br/>ВЕРХНОСТИ ПОЛОСЫ ПРИ ПРОКАТКЕ В КАЛИ-<br/>БРАХ</b>                                                                                                                 |     |
| <i>СТАСОВСКИЙ Ю.Н., ЧУХЛЕБ В.Л.</i><br><b>РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В ПРОЦЕССАХ ОБРА-<br/>БОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ: СОСТОЯНИЕ,<br/>ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ</b>                                                                                               | 93  |
| <i>ЖУЧКОВ С. М., РАЗДОБРЕЕВ В.Г., ПАЛАМАРЬ Д.Г.,<br/>ИВАНОВ А.П., ВОРОБЕЙ С.А.</i><br><b>КОМПЛЕКСНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ<br/>ПРОЦЕССА СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ И ПРОГНО-<br/>ЗИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕ-<br/>СКИХ СВОЙСТВ ГОТОВОГО ПРОКАТА</b> | 102 |
| <i>ЧИГИРИНСКИЙ В.В., ДУБИНА В.И., МИСНИК Е. Н.</i><br><b>ЭФФЕКТЫ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ</b>                                                                                                                                                       | 109 |
| <i>СТАЛИНСКИЙ Д.В., РУДЮК А.С., МЕДВЕДЕВ В.С.,<br/>КРЮКОВ Ю.Б.</i><br><b>ВОПРОСЫ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ И ЭНЕР-<br/>ГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ СОЗДАНИИ МЕТАЛ-<br/>ЛУРГИЧЕСКИХ МИКРО-ЗАВОДОВ</b>                                                               | 114 |
| <i>ТРИШЕВСКИЙ О.И., ПЛЕСНЕЦОВ С.Ю.</i>                                                                                                                                                                                                             | 119 |

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФОРМОВКИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ С МЕСТАМИ ИЗГИБА НА  $180^\circ$**

***ЧИГИРИНСКИЙ В.В., АНДРЮЩЕНКО С.А., КОРНИЕНКО В.В.***

131

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ЗАГОТОВКИ В УСЛОВИЯХ РЕАЛЬНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ**

Наукове видання

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ "ХПІ"**

**Збірник наукових праць**

Тематичний випуск

**"Нові рішення в сучасних технологіях"**

**Випуск №33**

**Технічний редактор Т.Л. Коворотный**

**Відповідальний за випуск В.М. Луньова**

Обл.-вид. №131-09

Підписано до друку 18.11.2009. Формат 60х84/16. Папір офсетний.

Друк офсетний. Ум.-друк. арк. 8.

Надруковано у видавництві "Технологічний центр".

61145 Харків, вул. Новгородська 3а

Тел./факс (057) 750-89-90