

ЛУГАНСЬКИЙ МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ

На гравах рукопису

ЧЕРЕДНИЧЕНКО Сергія Петрович

УДК.621.7:621.771.28

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ  
ТА СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ЛЕГОВАНОГО АУСТЕНІТУ

05.03.05 – Процеси та машини  
обробки тиском

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

Дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Луганськ 1992



Робота виконана в Луганському машинобудівному інституті на кафедрі "Машини та технологія обробки металів тиском" машинобудівного факультету.

Науковий керівник - доктор технічних наук,  
професор ЛЕШИНСЬКИЙ В.М.

Офіційні опоненти - заслужений діяч науки та техніки  
України, доктор технічних наук,  
професор СОКОЛОВ Л.М.

- кандидат технічних наук,  
доцент ГЛАДУШИН А.І.

Головне підприємство - ВО "Луганський станкобудівний завод"

Захист відбудеться 24 грудня 1992р. в 14 годин  
на засіданні спеціалізованої ради в Луганському машинобудівному  
інституті за адресою: 348034, м.Луганськ, квартал Молодіжний, 20а.  
Довідки по телефону: ( 0542 ) 46-67-88.

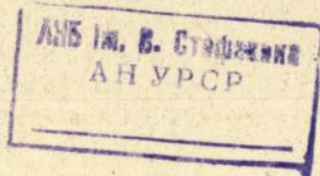
Спеціалізована рада К 068.44.02.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Луганського  
машинобудівного інституту.

Автореферат розіслано 24 листопада 1992р.

Вчений секретар  
спеціалізованої ради,  
кандидат технічних наук

Л.А.РЯБИЧЕВА



## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

У дисертаційній роботі викладено результати досліджень особливостей пластичної деформації та структуроутворення легованого аустеніту при термомеханічних режимах деформації стабільного аустеніту пружинних сталей ( 60С2, 60С2ХА ) в ізотермічних умовах, і переохолодженого аустеніту високолегованих ( типу Х6ВФ ) та швидкокризальних ( типу Г0Ж5 ) інструментальних сталей в неізотермічних умовах, вивчено умови, схеми і режими динамічного знеміцнення при деформації крученням з подальшим розтягом стабільного аустеніту пружинних сталей і динамічної надпластичності ( пластичності перетворення ) переохолодженого аустеніту високолегованих і швидкокризальних інструментальних сталей. На підставі проведених досліджень розроблено безвідходні ресурсозберігаючі технології гарячого навивання пружин з підвищеними точностними параметрами термічної обробки і правки ножівкових полотен у режимі динамічної надпластичності і пристрій для їх здійснення. Створені технології впроваджені на ВО "Луганський тепловозобудівний завод" у металургійному виробництві при виготовленні пружин ресорного підвишування локомотивів та на ВО "Луганський верстатобудівний завод" в інструментальному виробництві при виготовленні ножівкових полотен.

Актуальність роботи. Процеси знеміцнення, що розвиваються безпосередньо у ході деформації, вирішально впливають на формування структури і властивостей металевих матеріалів. Вивчення макроскопічних особливостей пластичної поведінки матеріалу при підвищеній температурі є основним джерелом інформації про названі процеси.

При гарячому навиванні пружин - деформації аустеніту вигином, виникають напруження, що в процесі навивання повністю не релаксують. Тому при закінченні процесу деформації і розневоленні гарячої пружини внаслідок пружної деформації відбувається викривлення її геометричних параметрів. Внаслідок чого неминуче застосування ручної праці для доведення виробу за розмірами.

Таким чином, важливе значення має добір динамічних процесів знеміцнення стабільного аустеніту при гарячому навиванні пружин, що забезпечують ефективне зниження внутрішніх напружень після навивання і термообробки, що дозволить забезпечити геометричні параметри, що задаються, при гарячому навиванні усунути важку ручну працю.

При виготовленні ножівкових полотен, дискових пил та ф.зз, - після прокатки, штамповки, термічної і механічної обробки виникають залишкові напруження, наявність яких викликає жолоблення напівфа-

брикатів і готових виробів, наслідком якого є значний брак продукції. Так, наприклад, при виробництві ножівкових полотен традиційними технологічними прийомами брак з названої причини становить 12 + 26%.

Тому пошук нових технологічних способів правки і термомеханічнообробки ножівкових полотен, дискових пил та інших подібних виробів з інструментальних та швидкорізальних сталей переохолодженого (метастабільного) аустеніту, основаних на використанні ефектів динамічної надпластичності, дозволить реалізувати ефективну релаксацію внутрішніх залишкових напружень у металі, що обробляється, усунути непоправний брак з жолоблення і підвищити надійність інструменту, що виготовляється.

Мета роботи. Метою роботи є:

1. Дослідження можливостей застосування в технологічних процесах гарячого навивання пружин ефектів динамічного знеміцнення, розробка технології гарячого навивання пружин в режимах динамічного знеміцнення, впровадження технології у виробництво.

2. Дослідження можливості реалізації в технологічних процесах правки ефектів динамічної надпластичності на легованих сталях з високою стабільністю аустеніту (швидкорізальні, леговані інструментальні), розробка технології правки ножівкових полотен у стані динамічної надпластичності і впровадження технології у виробництво.

У відповідності з поставленою метою в роботі вирішені такі завдання:

- вивчено макроскопічні особливості деформації стабільного аустеніту (динамічного знеміцнення) пружинних сталей при комбінованих режимах деформації крученням з наступним розтягом (чистий зсув - розтяг) в ізотермічних умовах;

- розроблено модель процесу динамічного знеміцнення попередньо деформованого стабільного аустеніту, що дозволяє кількісно визначити здатність того чи іншого сплаву до знеміцнення за макроскопічними параметрами процесу деформації розтягом;

- знайдено макроскопічні особливості неізотермічної деформації переохолодженого аустеніту швидкорізальних і легованих інструментальних сталей;

- розроблена модель механізму ефекту динамічної надпластичності (пластичності перетворення) при деформації переохолодженого легованого аустеніту;

- проведено аналіз напружено-деформованого стану і експеримен-

- тальні дослідження параметрів гнучття пакетів ножівкових полотен;
- досліджена можливість технологічного докладення ефекту динамічного знеміцнення при попередній деформації в процесі гарячого навивання пружин;
  - розроблено пристрій для гарячого навивання пружин з прутка із застосуванням ефекту динамічного знеміцнення і проведено аналіз ефективності його застосування по одержуваних точнісних параметрах пружин, що навиваються;

- на підставі проведених досліджень розроблено і впроваджено технологічні процеси гарячого навивання пружин в режимі динамічного знеміцнення з підвищеними точнісними параметрами, що виключають ручну працю коваля і брак по точності, та термічний обробці і правці ножівкових полотен в режимі динамічної надпластичності, що повністю виключають невиправний брак з жолоблення.

Наукова новизна. На підставі комплексних досліджень процесів динамічного знеміцнення стабільного аустеніту пружинних сталей в ізотермічних умовах і динамічній надпластичності при деформації переохлодженого аустеніту швидкорізальних і легованих інструментальних сталей в неізотермічних умовах встановлено:

- зниження пружної післядії при деформації стабільного аустеніту за комбінованою схемою;
- зміна коефіцієнтів зміцнення в залежності від режимів комбінованої деформації;
- дифузійна природа процесів пластичного структуроутворення аустеніту;
- наявність ефекту динамічної надпластичності ( пластичності перетворення ) переохлодженого аустеніту;
- наявність ефективної залишкової деформації за один цикл у межах  $0,2 + 1,5\%$  при напругах  $1 + 3$  МПа;
- швидкісний інтервал реалізації ефекту динамічної надпластичності в межах  $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \dots 10^{-4}$  сек $^{-1}$ ;
- інтервал швидкостей охолодження аустеніту  $\geq 150^\circ\text{C}$  сек у температурному інтервалі  $50 \dots 150^\circ\text{C}$  вище точки початку мартенситного перетворення на сталях, що мають високу стабільність аустеніту.

Теоретично обґрунтовані та експериментально підтверджені моделі процесу динамічного знеміцнення попередньо здеформованого стабільного аустеніту, що дозволяють кількісно визначити адатність того чи іншого сплаву до знеміцнення за макроскопічними параметрами

процесу деформації розтягом і механізму ефекту динамічної надпластичності при деформації переохолодженого легованого аустеніту.

Проведено аналіз напружено-деформованого стану при навиванні з натягуванням, визначені накопичені деформації по перетину пружини, що формується ( навивається ) в залежності від натягування і границі текучості матеріалу та напружено-деформованого стану при гнутті, і знайдено оптимальні термомеханічні режими технології правки.

Практична цінність і реалізація результатів роботи в промисловості. Розроблені нові методи створення безвідходних ресурсозберігаючих технологій на основі процесів динамічного знеміцнення і динамічної надпластичності та пристрій для їх здійснення, захищені авторськими свідоцтвами.

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження дозволили:

1. Розробити технології, організувати дільницю і впровадити у виробництво ресурсозберігаючі технологічні процеси термічної обробки і правки ножівкових полотен з сталі Х6ВФ в стані динамічної надпластичності на ВО "Луганський верстатобудівний завод" у 1987 році з річним економічним ефектом 291097 карб.

2. Розробити технології, спроектувати пристрій для гарячого навивання пружин і впровадити у виробництво ресурсозберігаючу технологію гарячого навивання пружин ресорного підвішування локомотивів в режимі динамічного знеміцнення на ВО "Луганський тепловозобудівний завод" у 1990 році з річним економічним ефектом 89104 карб.

Сумарний річний економічний ефект від впровадження роботи у виробництво склав 380201 карб. ( за цінами 1990 року ).

Апробація роботи. На Всесоюзному науково-технічному семінарі "Удосконалення ковальських машин ударної дії" ( м. Ворошиловград, 1985 ); республіканському науково-технічному семінарі "Фізика і механіка пластичних деформацій порошкових матеріалів" ( м. Луганськ, 1991 ); на зональних, вузівських науково-технічних конференціях і семінарах, присвячених створенню і дослідженню нових матеріалів і технологій ( м. Луганськ, 1985 - 1991 ).

Публікації. Основні результати виконаних досліджень опубліковані в 4 статтях та 7 авторських свідоцтвах на винаходи.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, 5 глав, переліку використаної літератури і 5 додатків. Вона містить 127 сторінок машинописного тексту, 72 малюнка, 11 таблиць та 127 бібліографічних джерел.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У введенні обґрунтована актуальність завдань, що розглядаються, сформульована мета дисертаційної роботи.

Перша глава присячена огляду літератури. Розглянуто особливості оптимізації режимів деформаційно-термічного структуроутворення в технологічних процесах обробки металів тиском.

Пластична деформація металів і сплавів при підвищених температурах, ключова операція технології термомеханічної обробки.

Процеси знеміцнення, що розвиваються безпосередньо в ході деформації, називаються динамічними. Динаміка знеміцнення при пластичній деформації має вирішальний вплив на формування структури і властивостей металевих матеріалів. Вивчення пластичної поведінки матеріалу при підвищеній температурі є основним джерелом інформації про вказані процеси.

Механізми статичного і динамічного знеміцнення металів і сплавів контролюються рухом дислокацій, яке не пов'язане з змінами розмірів елементів структури та їх кристалографічної орієнтації – динамічне повернення, зросту і переорієнтацією субзерен – динамічна полігонізація, рухом або міграцією меж з утворенням більш досконалих кристалів – динамічна рекристалізація, а при пластичній деформації механічних сумішей фаз, можливі явища часткового розпаду останніх – динамічна сфероїдизація, а при фазових перетвореннях в процесі деформації – динамічна надпластичність.

Розглянуті методи і режими технологічних додатків процесів деформаційно-термічного структуроутворення при гарячому навіванні пружин і правці пілкових полотен та фрез.

При гарячому навіванні пружин – деформації аустеніту вигином, виникають напруження, які в процесі навівання повністю не релаксують і при її закінченні та розневоденні гарячої пружини спостерігається наявність пружної деформації знеміцнення і пружиною губляться її геометричні параметри, одержані в процесі навівання – відбувається її викривлення і тому неминуче використання ручної праці для доводки виробу за розмірами.

При виготовленні ножівкових полотен, дискових пил та фрез, – після прокатки, штамповки, термічної і механічної обробки виникають залишкові напруження, наявність яких викликає жолоблення напівфабрикатів і готових виробів, і, як наслідок, приводить до значного браку.

Аналіз експериментальних і теоретичних досліджень, наведених в

огляді, дозволив сформулювати висновки і постановку завдання виконаної роботи.

#### Висновки:

1. За рахунок різних динамічних процесів знеміцнення, що обумовлюють деформаційно-термічне структуроутворення при гарячому навиванні пружин, можна забезпечити релаксацію внутрішніх напружень і, таким чином, досягти заданих геометричних параметрів виробів.

2. Значення макроскопічних деформацій за один цикл при випробуваннях евтектоїдної та інших сталей в умовах динамічної надпластичності ( пластичності перетворення ) становить значну величину  $0,1 + 0,3\%$ , що вказує на можливість технологічного використання ефекту, як основи інтенсифікації процесу правки.

#### Завданнями досліджень є:

1. Дослідження можливості використання в технологічних процесах гарячого навивання пружин ефектів динамічного знеміцнення, розробка технології гарячого навивання пружин в режимах динамічного знеміцнення і впровадження технології у виробництво.

2. Дослідження можливості реалізації в технологічних процесах правки ефектів динамічної надпластичності на легованих сталях з високою стабільністю аустеніту, розробка технології правки ножівкових полотен в стані динамічної надпластичності і впровадження технології у виробництво.

Друга глава містить описання матеріалів, обладнання і методики експериментальних досліджень. Враховуючи, що в роботі вирішуються прикладні завдання, для дослідження були обрані леговані пружинні сталі 60С2 і 60С2ХА ГОСТ 14959 - 79 та інструментальні легвана Х6ВФ ГОСТ 5950 - 73 і швидкорізальна Р6М5 ГОСТ 19265 - 73 сталі, з яких виготовляються пружини, шпикові полотна та інші вироби.

Для вивчення процесів впливу динамічного знеміцнення на пружно-пластичні властивості аустеніту пружинних сталей в температурній галузі стабільного аустеніту була спроектована та виготовлена установка для дослідження процесів деформації крученням з наступним розтягом. Вона складається з трубчатої нагрівальної печі опору з нагрівальним елементом. Зразок закріплено у верхній штанзі, з'єднаної з нерухомою траверсою випробувальної машини і в нижній штанзі, яка за допомогою штифта через підшипники з'єднана з копіром кручення через криволінійний паз і сконцентрована через бронзову направляючу введена в копір, і закріплена в ньому гзйков. Копір закріплено на рухомій траверсі випробувальної машини болтами і сконцентровано шти-

фтами.

Випробування проводилися за такою схемою: нагрів зразка до температурної галузі стабільного аустеніту, деформація зразка знакоперемінним крученням на  $+5^{\circ} + -5^{\circ}$ ;  $+10^{\circ} + -10^{\circ}$ ;  $+15^{\circ} + -15^{\circ}$  при використанні різних копирів і подальшим розтягом з записом індикаторних діаграм деформування в масштабі 100 : 1 на випробувальній машині ZD-4.

Для вивчення динамічного структуроутворення в неізотермічних умовах переохолодженого аустеніту при деформації розтягом і визначення температурного, швидкісного та часового інтервалів ефекту динамічної надпластичності була спроектована і виготовлена установка. Вона складається із трубчатої нагрівальної печі опору з нагрівальним елементом з можливістю вертикального переміщення. Зразок закріплений на штангах і знаходиться в печі, на ньому закріплена контрольна термопара, по якій визначалася справжня температура зразка. Охолоджувачий пристрій виконано у вигляді повітряного сопла, встановленого прот робочої частини зразка за трубчатою нагрівальною піччю.

Дослідження на динамічну надпластичність проводилися за такою схемою: нагрівання зразка до температурної галузі стабільного аустеніту, охолодження зі швидкістю  $3 + 80^{\circ}\text{C}$  сек, що досягалося обдуванням зразка стислим повітрям після зміщення печі вгору з записом в часі справжньої температури зразка і подальшого розтягу з записом індикаторних діаграм деформування в масштабі 100 : 1 на випробувальній машині ZD-4.

В третій главі представлені експериментальні і теоретичні дослідження особливостей структуроутворення легованого аустеніту при різних термомеханічних умовах.

При дослідженнях макроскопічних властивостей деформації стабільного аустеніту в ізотермічних умовах при комбінованій схемі деформації чистий зсув - розтяг пружинних сталей і аналізі експериментальних даних по впливу схем і режимів деформації на зміцнення і зменшення сталей 60С2 та 60С2ХА виявлено:

- значне зниження границі текучості при розтязі по...ередньо закручених зразків ( мал. I );
- зменшення гнучкості післядії при деформації зразків за комбінованою схемою;
- залежність коефіцієнтів зміцнення від схеми і режимів комбінованої деформації;
- дифузійна природа процесів пластичного структуроутворення

аустеніту при комбінованих схемах деформації.

Процес пластичного структуроутворення легованих сталей визначається зміною дислокаційної структури, структурою меж зерен, їх взаємною орієнтацією, фазовими перетвореннями при пластичній деформації. Макроскопічно ці зміни висловлюються як особливості кривих течії, що залежать від співвідношення ефектів зменшення і збільшення. Наявно, що вказані вище елементи пластичного структуроутворення аустеніту визначаються в першому наближенні зміною щільності дислокацій в процесі пластичної течії, залежність якої в функції часу можна представити співвідношеннями:

$$\frac{d\rho}{dt} = \alpha \frac{d\varepsilon}{dt} - \kappa\rho \quad (1)$$

- де  $\rho$  - щільність дислокацій;  
 $\alpha$  - параметр, що визначає властивість аустеніту до накопичення дислокацій при даній швидкості деформації;  
 $\kappa$  - константа термічної активації.

Щільність аустеніту до розвидку термічно активованих процесів здійснюється константою  $\kappa$ , яку згідно з теорією абсолютних швидкостей хімічних реакцій Арреніуса можна представити у вигляді функції Больцмана:

$$\kappa = \kappa_0 \exp(-E/RT) \quad (2)$$

- де  $\kappa_0$  - частотний фактор, незалежний від температури;  
 $E$  - енергія активації знімлюючих процесів;  
 $R$  - постійна Больцмана, рівна  $1,4 \times 10^{-23}$  дж К;  
 $T$  - абсолютна температура.

При постійній швидкості деформації  $\frac{d\varepsilon}{dt} = \alpha = \text{const}$ .  
та крайових умовах  $\rho(0) = \rho_0$  рівняння (1) має рішення

$$\rho = \left(\rho_0 - \frac{\alpha a}{\kappa}\right) \exp(-\kappa \frac{\varepsilon}{\alpha}) + \frac{\alpha a}{\kappa} \quad (3)$$

Ця функція вказує на експоненціальний характер зміни щільності дислокацій з залежності від супеню деформації, причому при значеннях  $E \gg a$  перший доданок (3) прагне до 0, а  $\rho$  приблизно дорівнює  $\frac{\alpha a}{\kappa}$ .

На основі моделі вивчені макроскопічні параметри кривих течії, що характеризують ефекти пластичного структуроутворення в залежності

ті від накопиченої деформації і температурного режиму процесу й вроблено розрахунок термоактиваційних констант. Залежність справжньої напруги від щільності дефектів кристалічних ґрат при ростазі полікристалів в загальному випадку описується співвідношенням:

$$\sigma_i = A(\rho)^n \quad (4)$$

де  $Ain$  - константи, визначені структурою матеріалу і термомеханічними умовами деформації;

$\sigma_i$  - справжня напруга.

Прийнято, що для випадку чистого розтягу названа функція відповідає (4), а для розтягу попередньо деформованого знакоперемінним крученням - співвідношенням:

$$\sigma_{ik} = A(\rho_k)^{n_k} \quad (5)$$

де індекс  $k$  вказує на попередню деформацію. Підставляючи у вираз (3) почергово співвідношення (4) і (5), маємо:

$$\rho \exp(-k \frac{\epsilon}{a}) - \frac{d_a}{k} (-k \frac{\sigma}{a}) + \frac{d_a}{k} = (\frac{\sigma_i}{A})^{\frac{1}{n}}$$

$$\rho \exp(-k \frac{\epsilon}{a}) - \frac{d_{k_a}}{k} (-k \frac{\sigma}{a}) + \frac{d_{k_a}}{k} = (\frac{\sigma_{ik}}{A})^{\frac{1}{n_k}} \quad (6)$$

Проводячи перетворення, одержуємо:

$$\frac{(d_k - d)a}{k} \exp(-k \frac{\epsilon}{a}) - \frac{(d_k - d)a}{k} = (\frac{\sigma_i}{A})^{\frac{1}{n}} - (\frac{\sigma_{ik}}{A})^{\frac{1}{n_k}} \quad (7)$$

Аналізуючи дані макроскопічних особливостей експериментальних даних пластичної деформації зразків наближено для оціночних розрахунків приймаємо  $n \approx n_k \approx 0,5$ . Тоді вираз (7) набуває вигляду:

$$\frac{(d_k - d)a}{k} [\exp(-k \frac{\epsilon}{a}) - 1] = \frac{\sigma_i^2 - \sigma_{ik}^2}{A^2} \quad (8)$$

Після логарифмування і підставки (2) маємо:

$$\ln \frac{A^2 a}{k} (d_k - d) + \frac{Q}{RT} + \ln [\exp(-k \frac{\epsilon}{a}) - 1] = \ln (\sigma_i^2 - \sigma_{ik}^2) \quad (9)$$

Таким чином, різниця  $(\sigma_i^2 - \sigma_{ik}^2)$  є функцією багатьох змінних, але, незважаючи на вказані складності, можна оцінити відповідність експериментальних даних запропанованій моделі (1) представивши результати експерименту у вигляді залежностей

$$\ln(\dot{\epsilon}_i^2 - \dot{\epsilon}_{ik}^2) = f\left(\frac{1}{T}\right) \quad ; \quad \ln(\dot{\epsilon}_i^2 - \dot{\epsilon}_{ik}^2) = f(\epsilon)$$

Розглянуті залежності  $\ln(\dot{\epsilon}_i^2 - \dot{\epsilon}_{ik}^2) = f\left(\frac{1}{T}\right)$  показують, що представлені дані з досить хорошим наближенням апроксимуються прямими, нахил яких різний для двох температурних залежностей від 800°C до 900°C і від 900°C до 1000°C. У відповідності з рівнянням (9)  $\tan$  кута нахилу даних прямих здійснює параметр  $\frac{Q}{R}$ , звідки легко знайти значення енергії активації.

Для аналізу залежності  $\ln(\dot{\epsilon}_i^2 - \dot{\epsilon}_{ik}^2) = f(\epsilon)$  представимо вираз (9) у вигляді:

$$F = \ln(\dot{\epsilon}_i^2 - \dot{\epsilon}_{ik}^2) = L + \ln(1 - \exp\frac{K\epsilon}{a}) - \frac{K\epsilon}{a} \quad (10)$$

де  $L = \frac{A^2 a}{K_0} (d_k - d) + \frac{Q}{RT}$ ,  
приймаючи  $L$  константі для даних температурно-швидкісних режимів деформування масмо:

$$\frac{dF}{d\epsilon} = - \frac{1}{1 - \exp\frac{K\epsilon}{a}} \exp\frac{K\epsilon}{a} - \frac{K}{a} \quad (11)$$

При наявності екстремума для рівняння (11) з урахуванням підстановки  $\exp\frac{K\epsilon}{a} = M$  масмо рішення:

$$M = \frac{K}{a+K} \quad , \quad \text{або} \quad \epsilon = \frac{a}{K} \ln \frac{K}{a+K} \quad (12)$$

Рішення (12) після підстановки рівняння Больцмана (2) дозволяє визначити координати екстремума функції (13), виходячи з моделі (1):

$$\epsilon = \frac{a}{K_0 \exp(-\frac{Q}{RT})} \ln \frac{K_0 \exp(-\frac{Q}{RT})}{a + K_0 \exp(-\frac{Q}{RT})} \quad (13)$$

Одержана залежність свідчить про те, що запровадана модель динамічної взаємодії зміцнюючих і знеміцнюючих процесів, заснована на дифузійній кінетиці накопичення і анигиляції дефектів кристалічних ґраток відповідає експериментальним даним залежності  $\ln(\dot{\epsilon}_i^2 - \dot{\epsilon}_{ik}^2) = f(\epsilon)$ .

На даних залежностях виражені максимуми, координати яких є температурно-залежними.

Розрахунок координат максимуму за рівнянням (13) у припущенні  $\frac{a}{K_0} = 10^{-3}$ , показує узгодження експериментальних даних з рівнянням (13). Враховуючи, що швидкість деформації при випробуваннях на розтяг знаходилася в межах  $a = 1 \text{ сек}^{-1}$ , константа  $K_0 = 1,1 \times 10^3$

сек<sup>-1</sup>. Останнє свідчить, що параметр  $K_0$  є по-суті кінетичною характеристикою реакційної рухомості дислокаційних комплексів, що вивначає розвиток динамічних знемінюючих процесів, який нас цікавить.

Запропанована модель і рішення, що витікають з неї, дозволяють кількісно визначити здатність того чи іншого сплаву до знеміцнення за макроскопічними параметрами процесу деформації розтягом при двох температурах випробувань. Для цього необхідна лише попередня деформація зразка крученням з малим ступенем ( $\gamma = 0,008 \dots 0,026$ ). Порівнюючи результати випробувань на розтяг вихідного і попередньо деформованого крученням аустеніту, визначаються параметри енергії активації і  $K_0$ , який дозволяє оцінити ступінь схильності матеріалу до динамічного знеміцнення на початковій стадії деформації.

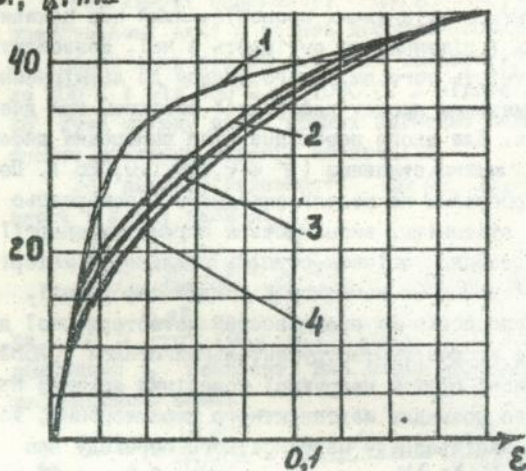
При дослідженнях макроскопічних особливостей неізотермічної деформації переохолодженого аустеніту інструментальних сталей (Х6ВФ і Р6М5) виявлено аномальні ефекти непружної поведінки зразків при температурах інтенсивного розвидку мартенситного перетворення, тобто в часовому інтервалі напіврозпаду мартенситного переходу при одержанні залишкової деформації за один цикл в межах  $0,2 + 1,5\%$  при напругах  $1 + 3$  МПа ( мал. 2 ). Температурні залежності пропорційності  $\dot{\epsilon} \sim 0,05$  для різних режимів охолодження зразків сталей Х6ВФ і Р6М5 ( мал. 3 ) також показують, що в процесі мартенситного перетворення різко падає опір малим пластичним деформаціям, тобто на наявність пластичності перетворення ( динамічної надпластичності ).

Оскільки розглядаються тільки макроскопічні особливості пластичної течії в галузі мікропластичних деформацій, наближено оцінюється відповідність одержаних даних по макроскопічних параметрах ( $\dot{\epsilon}_i, \dot{\epsilon}$ ) дифузійним механізмом переповзання зернограничних дислокацій при реалізації ефекту динамічної надпластичності. Експериментальні дані представлені у вигляді залежностей  $\dot{\epsilon}_i = \dot{\epsilon}_i(\dot{\epsilon})$  і  $\dot{\epsilon}_i = \dot{\epsilon}_i(\frac{1}{T})$  в логарифмічних координатах задовільно апроксимуються прямими лініями. Це вказує на більш вірогідне додержання залежностей між швидкістю деформації, напругом течії і температурою, основаних на дифузійних законах знеміцнення:

$$\dot{\epsilon} = A(\dot{\epsilon}/G)^n (G^6/RT) \exp(-Q/RT) \quad (14)$$

де  $G$  - модуль зсуву;  
 $R$  - постійна Больцмана;  
 $A, n, Q$  і  $v$  - константи;

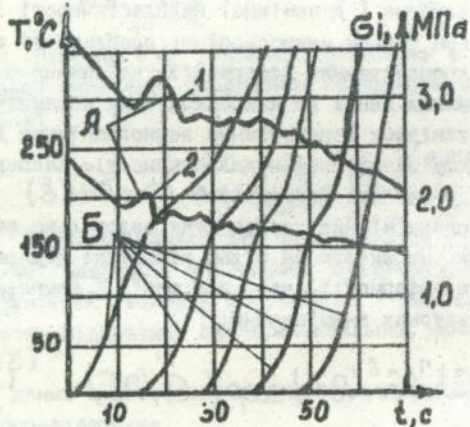
## Криві течії сталь 60С2

 $\sigma_i, \text{МПа}$  $T = 800^{\circ}\text{C}$ 

1 - розтяг;

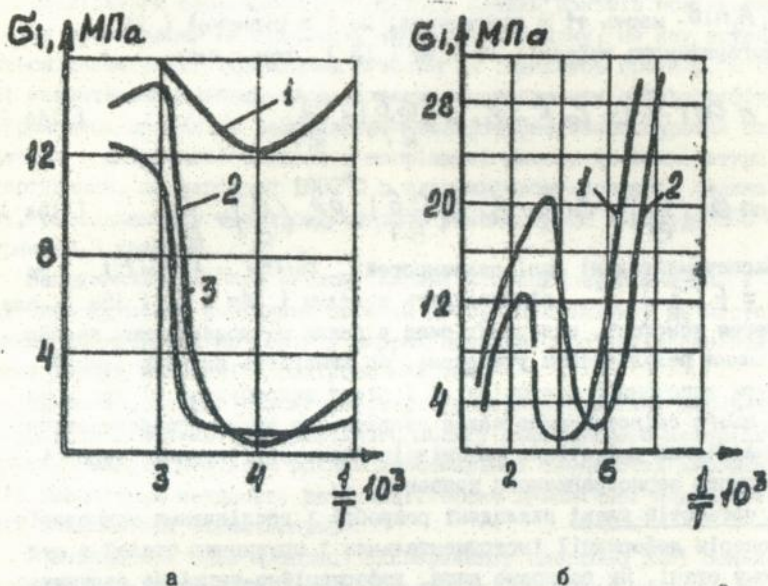
2 - кручення на кут  
 $+5^{\circ} + -5^{\circ}$  - розтяг;3 - кручення на кут  
 $+10^{\circ} + -10^{\circ}$  - розтяг;4 - кручення на кут  
 $+15^{\circ} + -15^{\circ}$  - розтяг.

Мал. 1.

Суміщена діаграма охолодження  
і деформації зразків з сталі Х6ВФА - криві охолодження  
з температур нагрі-  
ву під загартування;1 -  $850^{\circ}\text{C}$ ;2 -  $1000^{\circ}\text{C}$ .Б - криві зміцнення при  
 $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{ сек}^{-1}$ .

Мал. 2.

Залежності границі пропорціональності  
 $\sigma_{0,05}$  від зворотної температури



а - сталь X6BF, температура нагріву під загартування (стабільний аустеніт)  $1000^{\circ}\text{C}$ , охолодження до  $300^{\circ}\text{C}$ , - розтяг.  
 Охолодження:

- 1 - спокійне повітря;
- 2 - стиснуте повітря з  $P = 0,05$  МПа;
- 3 - стиснуте повітря з  $P = 0,40$  МПа.

б - температура нагріву під загартування:

- 1 - сталь X6BF -  $1000^{\circ}\text{C}$ ;
- 2 - сталь P6M5 -  $1210^{\circ}\text{C}$ ,  
 охолодження стиснутим повітрям з  $P = 0,40$  МПа до  $300^{\circ}\text{C}$ , - розтяг.

Мал. 3.

$$i \quad \dot{\epsilon} = A \frac{Gb}{RT} \left(\frac{G}{a}\right)^n \left(\frac{b}{a}\right)^p \exp(-Q/RT) \quad (15)$$

де  $d$  - розмір зерен;  
 $R, G, Q, A, n, p$  - мають ті ж позначення, що і в рівнянні (14).  
 Логарифмуючи вирази (14) та (15), одержуємо:

$$n \ln\left(\frac{G}{a}\right) = \ln \dot{\epsilon} - \ln A \left(\frac{Gb}{RT}\right) + \frac{Q}{RT} \quad (14a)$$

$$n \ln\left(\frac{G}{a}\right) = \ln \dot{\epsilon} - \ln A \left(\frac{Gb}{RT}\right) - p \ln\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{Q}{RT} \quad (15a)$$

Експериментальні дані залежностей  $\ln G_i = f(\ln \dot{\epsilon})$  та  $\ln G_i = f\left(\frac{1}{T}\right)$  відповідають моделям (14a) та (15a), але визначення констант, наведених вище рівнянь за досягнутими експериментальними результатами утруднені, бо вимагають аналізу тонкої структури легovanого аустеніту до і після випробувань. І все ж на основі цього співставлення можна вважати, що ефект псевдопластичності є наслідком дифузійних механізмів акомодатії границь зерен і відповідного зернограничного ковзання.

В четвертій главі викладені розробка і дослідження технологічних процесів деформації інструментальних і пружинних сталей в аустенітному стані. Як показано вище, деформаційно-термічне структуроутворення легovanого аустеніту обумовляє відповідну технологію обробки різних деталей або заготовок з пружинних та інструментальних сталей. Були обрані технологічні процеси гарячого навивання пружин із сталей 60С2 і 60С2ХА та процеси правки пилкових полотен із сталі Х6ВФ, як ті, що забезпечують усунення залишкових деформацій вказаних виробів, і, таким чином, підвищують точність їх виготовлення.

Проведено аналіз напружено-деформованого стану і експериментальні дослідження параметрів гнуща пакетів нжіткових полотен.

Штаба з сталі Х6ВФ внаслідок відомих технологічних труднощів її одержання, має значну "серповидність". Крім того, в процесі нарізання зуба полотна і його термічної обробки виникають додаткові залишкові напруження, що викликають відповідне коблення ножіткового полотна. В результаті велика кількість ножіткових полотен, до 20 процентів, вираковується через недодержання допуску на прямолінійність зуба ("серповидність"), який відповідно ГОСТ 6645 - 86 становить  $\leq 1,40$  мм. Основним завданням дослідження є розробка

технологічного процесу деформації, що усуває "серповидність" готового виробу. Природньо, що основою даного технологічного процесу є вигин пакету ножівкових полотен.

Дослідження технологічного процесу правки пакетів ножівкових полотен проводилося на пристрої, що містить призму, на яку встановлюється пакет з 100 ножівкових полотен та індикатор прогину. В процесі навантаження пакету зосередженим навантаженням осцилографічно вимірювалась залишкова деформація. Температурно-часовий режим охолодження і деформації полягав в нагріванні пакету до температури загартування, що дорівнює 1000°C в хлорбарієвому розплаві соляної печі, охолодженні в селітровій печі з температурою розплаву 300°C з витримкою 3 хвилини.

Напружений стан при чистому вигині є плоскодеформованим. У нашому випадку можна наближено вважати деформацію близьку до чистого вигину, враховуючи, що тертя у опорах незначне, бо ножівкове полотно має торці, виконані з радіусом  $R = 7\text{мм}$ .

Одним з основних параметрів термомеханічного режиму деформації є швидкість деформації відповідного обсягу деформуючого матеріалу. У нашому випадку доцільна оцінка максимальних швидкостей деформації, бо із зменшенням швидкості деформації ефект динамічної надпластичності виявляється більш яскраво.

У викладеній вище методиці експерименту одержано дані осцилографічного запису зусилля гнуття пакету, зміни стріли прогину пакету в процесі навантаження і його температури. З експериментальних даних виходить, що при швидкостях деформації зовнішніх волокон при вигині пакету полотен  $\dot{\epsilon} = 2,8 \times 10^{-3} \text{сек}^{-1}$  і  $\dot{\epsilon} = 2,8 \times 10^{-3} \text{сек}^{-1}$  початковий прогин волокон повністю усувається, що свідчить про ефективну реалізацію умов пластичного вигину, тобто найбільш повне виявлення ефекту динамічної надпластичності, -  $\sigma_s = 20 + 40 \text{МПа}$ . Слід відзначити, що дані значення  $\sigma_s$  приблизно на порядок перевищують величини на площадці пластичності при розтязі зразків при аналогічних термомеханічних умовах. На наш погляд, невідповідність є наслідком того, що в реальному технологічному процесі реалізуються більші швидкості деформації, ніж при розтязі. Однак,  $\sigma_s$  вигину у режимі динамічної надпластичності значно нижче  $\sigma_s$  вигину даного аустеніту при температурі 300°C ( $\sigma_s$  при  $T = 300^\circ\text{C}$  дорівнює 150 + 250 МПа ).

Виходить, що технологічно цей ефект динамічної надпластичності навіть при неповному його виявленні забезпечує значне зниження пито-

мих зусиль пластичного вигину і дозволяє реалізувати режим пластичного вигину при невеликих ступенях деформації, фактично усуваючи пружну післядію.

На підставі викладених вище результатів дослідження було розроблено технологічний процес термічної обробки ножівкових полотен 2800-0006 ГОСТ 6645 - 86 з правкою у режимі динамічної надпластичності і апробовано з використанням дослідної оснастки і обладнання на термічній ділянці інструментального цеху ВО "Луганський верстатобудівний завод" і проведено їх стендові дослідження.

Досягнута прямолінійність зуба з допуском на "серповидність" менше 1,0 мм, а стійкість ножівкових полотен з сталі Х6ВФ укладається в значення, передбачені для ножівкових полотен, виготовлених з швидкорізальної сталі Р9.

Дослідження можливості технологічного прикладення ефекту знеміцнення при гарячому навиванні пружин засновувалися на тому, що макроскопічні ефекти знеміцнення за рахунок реалізації попередньої деформації при температурах динамічної рекристалізації мають суттєві практичні значення для підвищення точності виготовлення пружин при гарячому навиванні.

Очевидно, що ефект знеміцнення в даному випадку можна використовувати, вводячи додаткову попередню операцію деформації безпосередньо перед кінцевим навиванням пружини, для чого необхідний спеціальний пристрій, що встановлюється на навивочному верстаті. З наведеної схеми випливає, що попередню деформацію, на відзнаку від схеми експерименту, що показано у главі 3, зручно задавати роликком, що відіграє нібито функції правильного ролику, аналогічно правильним машинам. Наявність вузла попередньої деформації приводить до зміни схеми формовки пружини від чистого вигину з розтягом. Останнє призводить до зміщення нейтральної лінії перетину в початковій стадії процесу і відповідних полів ковзання. Очевидно, що для визначення кількісних оцінок впливу натягування попередньої на характер формоутворення при одержанні пружини, розгляд полів ліній ковзання явно недостатній, тому що вони побудовані в наближенні деформації матеріалу, що не зміцнюється.

Одним з визначаючих факторів, обумовляє наявність залишкових напружень і, відповідно, деформацій пружин, є напружено-деформований стан прутка при формоутворенні пружини.

Треба відзначити, що параметри напруженого стану визначаються опором деформації, які, як показано в главі 3, в значному ступені

обумовлюються комбінацією деформаційних способів і термомеханічних зусиль деформації. Тому меть аналізу НДС при формовці пружини були:

- визначення накопичених деформацій в зовнішніх шарах заготовки;
- визначення справжнього опору деформації ( границь текучості ) матеріалу при даних температурно-швидкісних умовах за силовими параметрами процесу називання.

Для задання пластичного вигину з розтягом по Хиллу при додержанні умови рівноваги

$$q = a p \quad (16)$$

- де  $q$  - розтягуюче зусилля, віднесене на одиницю довжини профілю;  
 $p$  - тиск профілю на поверхню формуючого ролика або оправки;  
 $a$  - внутрішній радіус гнuttя прфілю.

Рішення для компонент напружень у внутрішніх волокнах має вигляд:

$$\sigma_r = 2k \ln r + C \quad (17)$$

- де  $k$  - границя текучості на зсув;  
 $C$  - визначається із умови  $\sigma_r = -p$  при  $r = a$  ;  
 $r$  - поточна координата точки перетину вигинавчого перетину.

Тоді вираз для компонент напруги у внутрішніх волокнах:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= 2k \ln \frac{r}{a}; \\ \sigma_\theta &= -2k (\ln \frac{r}{a} + 1); \\ \sigma_z &= -2k (\ln \frac{r}{a} + 0,5); \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

при  $a \leq r \leq r_0$

На нейтральній лінії при  $r = r_0$  виходячи з умови безперервності функції  $\sigma_r = f(r)$  маємо:

$$2k \ln \frac{r_0}{a} = -p - 2k \ln \frac{r_0}{a} \quad (19)$$

де  $B$  - зовнішній радіус гнuttя профілю,  
звідки:

$$r_0^2 = a \cdot B \exp\left(-\frac{p}{2k}\right) \quad (20)$$

Звідси виходить, що положення нейтральної лінії при вигині в



розтягом зміщується до внутрішньої поверхні за законом:

$$\sigma_0 = \alpha \exp\left(-\frac{\rho}{4k}\right) \quad (21)$$

де  $\alpha = \sqrt{aB}$  або, враховуючи  $q = a \cdot \rho$

$$\sigma_0 = \alpha \exp\left(\frac{q}{4ak}\right) \quad (22)$$

Із останнього рівняння витікає, що за всіх інших рівних умов опору деформації границя текучості на зсув є головним параметром, що визначає ступінь зміщення нейтральної лінії при вигині з розтягом. Це в свою чергу приводить до значної зміни деформованого стану крайніх зовнішніх волокон:

$$\epsilon_{\sigma}^{\max} = \epsilon_{\sigma}^{\max} = 0,5 \left[ \frac{\sqrt{aB}}{B^2} \exp\left(-\frac{q}{4ak}\right) \right] \quad (23)$$

Розрахунки за рівняння (23) показують, що накопичені деформації на зовнішніх і внутрішніх волокнах залежать від співвідношення  $q/k$ . Таким чином, якщо з одного боку зменшується границя текучості на зсув  $k$ , а з іншого боку підвищується напруга  $q$ , то накопичені деформації зменшуються.

Зниження накопичених деформацій по перетину прутка при формуванні вигином з натягом пружини разом з зниженням границі текучості на зсув, призводить до зменшення деформації гнучкої післядії, забезпечує зменшення пружинення і залишкових напруг і дозволяє зменшити жолоблення пружин і підвищити точність її розмірів.

На підставі аналізу НДС було розроблено пристрій для гарячого навивання пружин, що дозволяє здійснити вказані вище режими деформації.

При випробуванні виготовленого дослідного пристрою для гарячого навивання пружин було виявлено повну відповідність розробленій моделі і режимів комбінованої деформації при практичній їх реалізації, тобто на навитих пружинах відсутня деформація гнучкої післядії, геометричні параметри за точністю повністю повторюють точність формуєвальних елементів і на 100 процентів укладаються у допуск за коливанням міжвиткової відстані за ГОСТ І452 - 86.

В результаті цього відпадає застосування операції ручної резводки пружин ковальми ручної ковки.

В п'ятій главі описані результати розробки і впровадження оснастки, пристроїв і технологічних процесів, що описані у главі 4.

Були розроблені і виготовлені пристосування, оснастка, реорганізована дільниця термічної обробки ножівкових полотен в терміч-

ному цеху, на якій проведено перепланування основного технологічного обладнання з додатковою установкою в технологічну лінію термічної обробки пресу гідравлічного зусиллям  $P = 100$  кН для одночасної правки 800 + 1000 штук ножівкових полотен в режимі динамічної надпластичності і впроваджено технологічний процес термічної обробки та правки ножівкових полотен в режимі динамічної надпластичності з продуктивністю 75000 + 100000 штук на добу ( 3-х змінний режим роботи ) на ВО "Луганський верстатобудівний завод" у серпні 1987 року.

В результаті впровадження даних технологічних процесів повністю довелось усунути залишкові напруження і деформації у виробах і виключити брак, в результаті чого одержано річний економічний ефект на суму 291097 карбованців.

Для практичної реалізації комбінованого процесу гарячого навивання пружин у режимі динамічного знеміцнення, були спроектовані, виготовлені і впроваджені у виробництво ( "блоки" ) на пружинній дільниці ковальско-пресового цеху металургійного виробництва ВО "Луганський тепловозобудівний завод" продуктивністю до 1500 пружин на добу ( 3-х змінний режим роботи, потужність дільниці - 2500 тонн пружин на рік ) у січні 1990 року.

В результаті впровадження виключено ручну працю по розведенню витків пружин і ліквідовано брак по різнокроковості витків пружин і одержано річний економічний ефект на суму 89104 карбованців.

#### ВИСНОВКИ

1. Розроблено новий технологічний процес деформації стабільного аустеніту в ізотермічних умовах пружинних сталей в режимі динамічного знеміцнення.

2. Розроблено новий технологічний процес деформації переохолодженого аустеніту в неізотермічних умовах швидкорізальних і легованих інструментальних сталей в режимі динамічної надпластичності.

3. Вивчено макроскопічні особливості деформації стабільного аустеніту ( динамічного знеміцнення ) пружинних сталей при комбінованих режимах деформації і знайдено ефекти зниження границь текучості на 30 + 60%.

4. Розроблено модель процесу динамічного знеміцнення попередньо деформованого стабільного аустеніту, що дозволяє кількісно визначити здатність того чи іншого сплаву до знеміцнення за макроско-

підними параметрами процесу деформації розтягом.

5. Вивчено макроскопічні особливості неізотермічної деформації переохолодженого аустеніту швидкорізальних і легованих інструментальних сталей в режимі динамічної надпластичності і знайдено температурно-швидкісні інтервали псевдопластичної течії в межах до 2% деформації при  $\dot{\epsilon}_i = 1 + 3 \text{ МПа}$ .

6. Проведено аналіз напружено-деформованого стану і експериментальні дослідження параметрів гнuttя пакетів нажівкових полтен з сталі Х6ВФ в режимі динамічної надпластичності.

7. Проведено аналіз напружено-деформованого стану гнuttя з натягом і попередньою деформацією в режимі динамічного знеміцнення і знайдені оптимальні технологічні параметри процесів.

8. Розроблено пристрій для гарячого навивання пружин з прутка з використанням ефекту динамічного знеміцнення і проведено аналіз ефективності його застосування за одержаними точностними параметрами пружин, що навиваються.

9. На підставі досліджень:

- розроблено технології, організовано дільницю і впроваджено у виробництво прцеси сумісної термо-деформаційної обробки ножівкових полотен з сталі Х6ВФ в стані динамічної надпластичності, що повністю виключає брак по жолобленню на ВО "Луганський верстатобудівний завод" у 1987 році з річним економічним ефектом 291097 карб.;

- розроблено технології, спроектовано і виготовлено пристрої для гарячого навивання пружин ресорного підвішування локомотивів і впроваджено у виробництво комбінований процес гарячого навивання пружин в режимі динамічного знеміцнення з сталей 60С2 та 60С2ХА, що виключає ручну працю і брак по точності на ВО "Луганський теплозобудівний завод" у 1990 році з річним економічним ефектом 89104 карб.

#### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ ВІДОБРАЖЕНО В ТАКИХ ДРУКОВАНИХ РОБОТАХ

1. С.П.Чердниченко, В.А.Стоянов, А.В.Панченко. Підвищення стійкості деталей КШМ прсти спрацювання зміцненням наплавкою і пластичною деформацією. // Тези доповідей Всесоюзного науково-технічного семінару "Удосконалення ковальських машин ударної дії", 19-20 вересня 1985, Ворошиловград, - С.131.

2. А.Г.Семенов, Г.Л.Шенкман, С.П.Чердниченко. Рівноканальне кутове пресування високолегованих алюмінієвих сплавів. // Тези доповідей республіканського семінару "Фізика і механіка пластичних де-

формацій порошкових матеріалів", 9-12 квітня 1991, Луганськ, - С. 44.

3. С.П.Чередниченко, В.М.Зверев. Вибір оптимального матеріалу для виготовлення сталевих загартованих сердечників. - Москва, 1989, Деп. в ЦНІІІІТЕІ, № 3158/374.

4. С.П.Чередниченко, Т.Б.Грибова. Дослідження ресурсозберігаючого технологічного процесу фінішної термомеханічної обробки ножівкових полотен. // Зб. наукових праць аспірантів і тих, що здобувають вчений ступінь, "Сучасні ресурсозберігаючі технології одержання і обробки матеріалів у машинобудуванні". - Київ, УМКВУ, 1991, С. 22-24.

5. А.с. № 944711 СРСР. Спосіб виготовлення порожнистих куль. Опбл. 23.07.82 / С.П.Чередниченко, М.А.Клещов, Б.Л.Рибошапко, Е.І.Клігман/.

6. А.с. № 1005999 СРСР. Пристрій для виготовлення порожнистих куль. Опбл. 23.03.83 / М.А.Клещов, С.П.Чередниченко, В.М.Хомич/.

7. А.с. № 1186342 СРСР. Пристрій для висадки трубних заготовок. Опубл. 23.10.85 / М.А.Клещов, В.М.Лещинський, С.П.Чередниченко, В.М.Хомич/.

8. А.с. № 1248118 СРСР. Спосіб виготовлення виробів з рельєфом на угнутий поверхні і пристрій для його здійснення. Зареєстр. 01.04.86 / М.А.Клещов, С.П.Чередниченко, В.М.Лещинський, В.М.Хомич/.

9. А.с. № 248958 СРСР. Зареєстр. 02.02.87 / В.М.Лещинський, С.П.Чередниченко, В.А.Іванов, П.К.Галайда, М.І.Кириченко / Не підлягає опублікуванню.

10. А.с. № 283451 СРСР. Зареєстр. 03.10.88 / А.А.Крайник, С.І.Ларіонов, В.М.Лещинський, В.М.Сегал, Ю.М.Лебедєв, С.П.Чередниченко / Не підлягає опублікуванню.

11. А.с. № 1719138 СРСР. Пристрій для гарячого навивання пружин з прутка. Опубл. 15.03.92 / С.П.Чередниченко, В.М.Лещинський, Г.М.Вільховецький, Є.А.Гільберт, І.Ф.Цикоза, В.М.Арцев/.

*Чередниченко*

Ав 26.068

**АВ 26.068**

Підписано до друку 19.II.92. Формат 60 x 84 I/16.Обсяг I д.а.  
Заказ 527. Тираж 100.

---

348034, м. Луганськ, кв. Молодіжний, 20 а, РОТАПРИНТ ЛМБІ