



ХИМИКОТЕХНОЛОГИЧЕН И МЕТАЛУРГИЧЕН УНИВЕРСИТЕТ

ФАКУЛТЕТ ПО МЕТАЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОЗНАНИЕ

КАТЕДРА „ФИЗИЧНА МЕТАЛУРГИЯ И ТОПЛИННИ АГРЕГАТИ”

маг. инж. Евгений Александрович Панин

ТЕМА

**РАЗРАБОТВАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА НОВ ИНОВАТИВЕН ПРОЦЕС
“ВАЛЦУВАНЕ – ПРЕСУВАНЕ” ЗА ПОЛУЧАВАНЕ НА
УЛТРАДРЕБНОЗЪРНЕСТА СТРУКТУРА НА МЕТАЛА**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за придобиване на образователната и научна степен „доктор”
по научна специалност 5.9. Металургия
(Технологии, машини и системи за обработка чрез пластично деформиране)

Научни ръководители: доц. д-р инж. Тончо Койнов

доц.д-р инж. Сергей Лежнев

Научно жури:

1. доц. д-р инж. Розина Йорданова - председател и рецензент
2. проф. д-р инж. Никола Дюлгеров - рецензент
3. проф. д-р инж. Цоло Рашев
4. доц. д-р инж. Тончо Койнов
5. доц. д-р инж. Димитър Коларов

Дисертационният труд е написан на 162 страници, съдържа 99 фигури и 23 таблици. Цитирани са 145 източника.

Представеният дисертационен труд е обсъден и приет за защита на заседание на Разширен научен съвет на научното звено на катедра „Физична металургия и топлинни агрегати“, състояло се на 20.06.2017 година.

Публичната защита на дисертационния труд ще се проведе на 28.09.2017 г. от 14⁰⁰ часа в зала 431, сграда „А” на ХТМУ.

Материалите са на разположение на интересувалите се на интернет страницата на ХТМУ и в отдел „Научни дейности”, стая 406, етаж 4, сграда „А” на ХТМУ.

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на темата на изследването

Подобряването на качеството на деформируемия метал е един от основните проблеми при разработването на нова технология или подобряване на процеса на обработка на металите. Независимо от това какъв тип (валцуване или пресуване) е разработвания процес, се препоръчва да се прилага деформиране, където се получава чисто срязване, тъй като в този случай се изразходва минимално количество енергия за деформация на метала, достига се максимално и еднородно проработване на заготовките по сечението и се осигурява затваряне на вътрешни дефекти.

През последните години се разработват редица нови процеси за получаване на метали с ултрадребнозърнеста структура (УДС), при които основният принцип е реализацията на проста схема на срязване. Това намалява разхода на енергия и се достига интензивност на деформация, достатъчна за получаване на ултрафини структури.

Един от тези методи е пресуването в матрици с различни конструкции, по-специално равноканална стъпкова матрица. Но този метод има и съществен недостатък - не могат да се деформират дълги заготовки. Дължината на изходните заготовки е ограничена от работното пространство на пресата, по-специално - работния ход на пуансона на пресата. Също така, недостатък на този метод на деформация е и фактът, че не се осигурява непрекъснат процес на пресуване. Тези обстоятелства правят актуални и значими настоящите изследвания върху разработването на нови технологии за производство на дълги детайли, които имат по-високо ниво на механични свойства.

Степен на разработване на дадения проблем

За премахване на ограниченията по дължината на заготовките, през последните години се разработват така наречените ко-процеси на деформация, които са комбинация от два или повече конвенционални деформационни процеса.

Главната особеност на комбинираните методи на деформация е, че често по време на тяхното прилагане се намаляват или напълно елиминират недостатъците на конвенционалните процеси на деформация, които са включени в комбинирания процес.

По-голямата част от комбинираните методи се реализират чрез използването на резервните сили на триене, възникващи върху металната повърхност в контакт с валците. От големината на тези сили зависи както самата възможност за реализиране на процеса, така и възможните резултати, които могат да бъдат постигнати. Задълбоченото проучване на природата на резервните сили на триене в огнището на деформация при валцуване, а също така – и на факторите, влияещи върху размера им, доведоха до извода, че са

на лице зони на хлъзване и зони на прилепване по контактната повърхност под действието на тези сили. Тези сили могат да бъдат балансирани или чрез тангенциални сили на триене, действащи в зоната на изпреварване, или поради външно въздействие под формата на предна опора. Горното позволи да се формулира **целта на изследването**: Проучване и разработване на нов иновационен процес на "валцуване – равно канално ъглово (РКЪ) пресуване" за да се получи ултрадребнозърнеста (УДС) метална структура.

Тази цел се осъществява чрез следните **подцели**:

1. Теоретично изследване на комбинирания процеса "валцуване – РКЪ - пресуване", за да се определят енерго-силовите и кинематични параметри и да се обоснове технологичен режим с използване на дълги заготовки.
2. Компютърно моделиране на ко-процеса на програмните комплекси Deform-3D и Simufact Forming за анализ на напрегнато-деформационното състояние (НДС), както и идентифициране на характеристиките на изтичане на метала и да се предскаже развитието на микроструктурата в зависимост от геометричните и технологичните параметри на процеса.
3. Разработване на лабораторна инсталация за реализиране на ко-процеса с якостен анализ на най-важните възли на инсталацията. Реализиране на тензометрични изследвания на енерго-силовите параметри на процеса.
4. Изследване на микроструктурата и механичните свойства на заготовките от алуминиева (Al6063) и медна сплави (M1) (по ГОСТ) след реализация на процеса. Анализирание на ефекта от различни режими на предварителна термообработка върху развитието на структурата на сплавите.
5. Обект на изследванията по дисертацията е ко-процесът „валцуване-РКЪ-пресуване“, предназначен за получаване на ултра дребнозърнеста структура на деформирания метали и сплави. Изследвани са алуминиева (Al6063) и медна (M1) сплави.

Научни приноси:

1. Разработена е методика за изчисляване на енерго-силовите и кинематични параметри на новия ко-процес за интензивна пластична деформация.
2. Въз основа на резултатите от компютърното моделиране е установена зависимост на влиянието на геометричните и технологични параметри върху напрегнато-деформационното състояние на метала в процеса на деформация.
3. Получена е формула за изчисляване на разширяването на метала и са определени корегиралните коефициенти в модела.

4. Установено е влиянието на режимите на предварителната термообработка върху нивото на развитие на структурата след ко-процеса на цветни метали с различна степен на чистота.

Теоретичният принос на изследването се състои в това, че е развита и реализирана идеята за разработване на непрекъснат технологичен процес на деформация с възможност за получаване на дълги изделия.

Научно-приложни приноси

1. Получени са дълги заготовки от сплави Al6063 и M1 с по-високи физико-механични свойства благодарение на получената ултрафина структура.
2. Създадена е програма за изчисляване на енерго силовите и кинематични параметри на комбинирания процес на "валцуване – РКЪ пресуване" като инструмент за проектиране на технология за производство на дълги заготовки с УДС.
3. Разработени са технологични режими за получаване на пръти от сплави Al6063 и M1 с високи физико-механични свойства за конструираната лабораторна инсталация, включващи както режимите на деформация, така и оптималните режими за предварителна термообработка.

Методология и изследователски методи:

Методологичната основа на проучването са разработките на учените В.М.Сегал, Р.З.Валиев, А.А.Богатов, В.Л. Колмогоров, В.А.Тюрин, Т.Г.Ленгдон и др. Изследването е извършено с помощта на основните принципи и традиционните методики в пластичната деформация на металите с използването на съвременни виртуални софтуерни продукти, по-специално: на Deform-3D и Simufact Forming; квалитетичен анализ на данните; както и използването на универсални методи за изучаване на структурата и свойствата на метала.

Степента на проработване

Дисертацията е завършен научен труд, в който е решена актуалната задача за подобряване на качеството на заготовки от сплави на базата на алуминий и мед чрез прилагане на интензивна пластична деформация в комбиниран процес на "валцуване – РКЪ пресуване". Този резултат е получен чрез определяне на закономерностите на промяна в напрегнато-деформационното състояние на метала и развитието на техническите решения на метода в лабораторни условия.

Личното участие на автора се състои в определяне на целите, избора на методиките, научното обосноваване на получените резултати и във формулирането на заключенията. Всички експериментални резултати,

включени в дисертацията, са получени или от автора или с прякото му участие.

Основни положения, представени за защита:

- комбиниран метод за деформация, който осигурява подобряване на механичните свойства и значително намаляване на размера на зърната в обема на заготовката чрез прилагане на интензивна знакопроменлива деформация;
- нови способи за прилагане на комбинирания процес, защитени с патенти на Казахстан, с теоретични и с експериментални изследвания е доказана тяхната ефикасност за осигуряване на хомогенна металната структура;
- метод за изчисляване на енерго-силовите, както и кинематичните параметри на комбинирания процес на "валцуване - РКЪпресуване";
- модели за изчисляване на енерго-силовите и кинематични параметри на процеса;
- закономерности на изменението на напрегнато-деформационното състояние на метала в огнището на деформация за различни основни параметри на процеса;
- резултати от анализа на влиянието на ко-процеса върху микроструктурата и механичните свойства на алуминиевата и медна сплави марки М1 А16063.

Достоверността на научните становища, заключения и препоръки се постига с; използването на съвременни методики за изследване на напрегнатото-деформационно състояние на металите по метода на крайните елементи за моделиране; прилагането на съвременни методи за изследване на микроструктурата и механичните свойства на металите и сплавите; провеждането на лабораторни изследвания и квалитетно обработване на резултатите;. Потвърждение на достоверността на изследването са и получените 4 патенти на Република Казахстан.

Апробация на дисертационната работа.

Основните резултати на дисертацията са докладвани и обсъдени на следните конференции:

- на 10-а международна научно-практическа конференция "Структурна цялост на заварени конструкции" (Румъния, Тимишоара 2013);
- на международния научно-технически конгрес "ОМД-2014. Основни проблеми. Иновативни материали и технологии "(Москва, Русия, 2014 г.);
- на международната научна конференция "Материалознание и инженерни технологии" (Китай, Шанхай, 2014 г.);

- на 11-та международна научно-практическа конференция "Технологии на пластичността". (Япония, Нагоя, 2014 г.);
- на XVI Международна научно-техническа конференция "Нови технологии и постижения в металургията, материалознанието и производството" (Полша, Ченстохова, 2015 г.);
- на 9-а Международна научно-практическа конференция "Обработка и производство на съвременни материали" (Австрия, Грац, 2016 г.);
- на международната научно-практическа конференция "Металургия и материали" (България, София, 2016 г.);
- на 4-та Международна научно-практическа конференция "Нови тенденции в областта на структурните материали" (Чехия, Пилзен, 2016 г.).

Връзка на изследванията по дисертацията с други научни програми

"Разработка и усъвършенстване на технологии на пластична деформация за получаване на наноструктурни материали" по програма "Международно сътрудничество в областта на науката." 2007-2010г. (Комитет по наука към Министерството на образованието и науката на Република Казахстан).

Публикации.

Резултатите от дисертацията са отразени в 18 публикации и резюмета, от които: 2 от списъка с публикации, препоръчани от ВАК; 9 публикации, включени в международни бази данни, цитирани в «Scopus» и «Web of Science», и 4 патента на Република Казахстан. Също така по основните резултати от дисертацията е написан раздел от монографията "Иновативни метални материали", под редакцията на В.М.Колоколцев (Магнитогорск, 2016 г.).

Структура и обем на дисертацията.

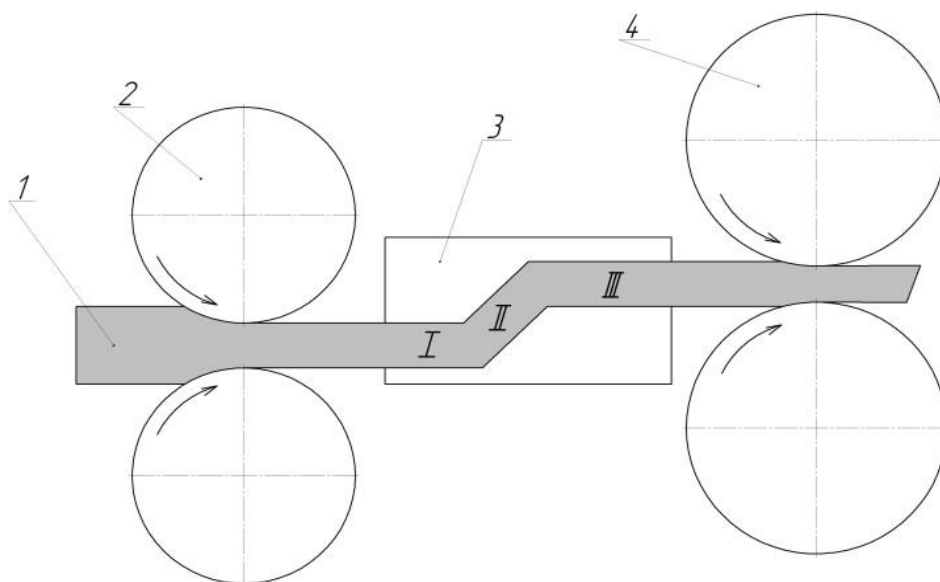
Дисертацията е представена на 161 страници , в това число 99 фигури и 23 таблици. Тя включва въведение, пет глави заключение, списък на използваните източници от 145 названия.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИЯТА

В увода е показана и обоснована актуалността на темата на дисертацията, формулирани са целите и задачите, представена е научната новост и практическата значимост, дадени са основните положения, представени за защита.

В първата глава се дава оценка на текущото състояние на проблема за подобряване на качеството на метални изделия в зависимост от метода на пластична деформация, анализ на оборудването и методите за производство на заготовки с УДС. Въз основа на анализа са формулирани целите и задачите на изследването.

Втората глава е посветена на теоретичните изчисления на процеса "валцуване. - РКЪпресуване". Разработен и описан е нов метод за интензивна пластична деформация - "валцуване - РКЪпресуване", който в сравнение с конвенционалното пресуване в РКЪ-матрица премахва ограниченията върху изходните размери на заготовките. А наличието на втората двойка валци след матрицата дава възможност за непрекъснат процес на деформация.



Фиг. 1 - Диаграма на процеса "Валцуване - РКЪпресуване"

Пресуването в това устройство се реализира, както следва. Заготовката 1 се подава на валците 2, които, благодарение на силите на триене, я захващат и на изхода от тях я изтласкват през каналите на РКЪматрицата 3, последователно изтласквайки я през входния канал I, междинния (деформиращ) канала II и изходящия канал III. След като предният край на заготовката излезе от матрицата, той влиза във втората двойка валци, които го изтеглят от матрицата (Фиг. 1).

Като резултат от теоретичните изчисления са разработени аналитични формули за определяне на напреженията в РКЪматрицата при преминаването през нея на заготовката посредством активните фрикционни сили, създадени от калибрираните и гладки валци.

Изведени са аналитични уравнения за изчисляване на напреженията на пресуване и валцуване в гладки и калибрани валци, необходими за деформиране на заготовката, в зависимост от геометрията на канала и коефициента на триене (1-3).

$$P_{\text{ПРОК}} = 2b_1 R \sigma_s \mu_1 \left(\alpha - \gamma_1 - \gamma - \frac{\alpha^2}{2\mu_1} \right) \quad (1)$$

$$P_{\text{ПРЕСС}} = 2\sigma_s \mu_2 \left[(2l_1 + l_2)(b_1 + h_1) + 2h_1^2 \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} + \frac{\operatorname{tg} \varphi \cdot h_1}{\sqrt{3}\mu_2} \right], \quad (2)$$

$$P_{\text{ПРОК_КАЛ}} = 2R \sigma_s \mu_1 \left[b_1 \left(\alpha - \gamma_1 - \gamma - \frac{\alpha^2}{2\mu_1} \right) + h_{\text{CP}} \alpha \right], \quad (3)$$

Един от основните фактори, влияещи върху силата на пресуване, е ъгълът между зоните 1-3 на канала на матрицата. За определяне на оптималния ъгъл на канала, осигуряващ усилия на пресуване по-малки от усилията на валцуване, е разработена програма в редактора Excel. Тази програма позволява графически да се определи оптималният ъгъл, базирайки се на диаграми за усилията на пресуване в зависимост от ъгъла на стиковане на каналите, а също така - и силите на валцуване като функция от абсолютната деформация.

Установено е, че използването на калибрани валци, при еднакви изходни параметри, позволява ко-процесът да се осъществи с по-малък ъгъл при значително по-малки деформации. Друго несъмнено предимство на използването на калибрани валци е възможността да се контролира разширяването на заготовката по време на деформацията във валците.

Реализирано е кинематично изчисление на процеса с използване на гладки и калибрани валци, за да се определят параметрите, които гарантират непрекъснатост на процеса. Беше установено, че освен скоростта на метала на изхода от матрицата, ключов фактор е и диаметърът на втората двойка валци, чрез вариране на стойностите на които може да се постигне оптимална скорост на валците за реализирането на този комбиниран процес.

В третата глава са представени резултатите от компютърна симулация на изследвания процес в софтуерните системи Deform (изучаване на напрегнато-деформирано състояние) и Simufact (изучаване на еволюцията на микроструктурата). Симулационните резултати показват, че, както в случая с гладки валци, така и с калибрани, изборът на оптимални геометрични и технологични параметри е от решаващо значение за възможността за осъществяване на процеса на "валцуване-РКЪпресуване". Грешен избор поне на един от параметрите, може да доведе до невъзможност за реализиране на процеса.

Рационални геометрични и технологични параметри на процеса за производство на заготовки с квадратно или правоъгълно напречно сечение бяха определени с програма, съставена в редактор Excel, която беше разработена на катедрата по пластична деформация на Карагандинския държавен индустриален университет.

За определяне на стойностите на напрежението и деформацията е необходимо да се намерят стойностите на компонентите на съответните тензори, които за триизмерно изтичане на метала е много трудно да се визуализират

Поради това, обикновено, когато се разглеждат параметрите на напрегнато-деформационното състояние (НДС) се използват прости показатели на интензивността и напрежението, или така наречените еквивалентна деформация и (Фиг. 2а) и еквивалентно напрежение (Фиг. 2б).

При прилагането на комбинирания процеса в метала последователно възникват три зони на деформация, което прави процеса доста сложен. Следователно, за изучаването на параметрите на НДС, е необходимо да се изследва не само еквивалентната деформация и еквивалентното напрежение, но също така и параметрите, които позволяват да се оцени делът на напреженията на опън и натиск в огнището на деформация. Такива са главните напрежения σ_1 и σ_3 (Фиг. 2в-г).

За да се изследва влиянието на геометричните и технологични параметри върху състоянието на напрегнато-деформационното състояние на метала при ко-процеса, за базова заготовка в модела е приета 20x20mm. При изследването на напрегнатото състояние на метала, беше установено, че тази схема на деформация осигурява отстраняване на възникващите напрежения на опън, което е благоприятен фактор за образуване на ултрафини структури при интензивната пластична деформация.

Резултатите от изследването на еквивалентните деформации на повърхността и в централните слоеве на заготовката показва, че разпределението по напречното сечение на този параметър е неравномерно. По този начин, след валцуване във втората двойка валци еквивалентната деформация достига стойност 1,2 в повърхностните слоеве и 1,0 и централните слоеве, т.е.разликата в стойностите се увеличава до 20%.

Разгледаният базов модел на ко-процеса има оптимални гранични стойности на геометричните и технологични параметри, значенията на които предварително са определени по програмата, описана във втората глава. Понататък е поставена задачата да се изследва влиянието на всеки един от тези параметри върху напрегнато-деформационното състояние на процеса.

За тази цел, са разработени още няколко модела, които се различават от базовия модел с промяната на значението на само един параметър. Също така, се имаше предвид и необходимостта от "истинско" изменение,

т.е.променят се само онези параметри, които могат да варират на лабораторно-промишления агрегат.

В резултат на това, са разработени допълнителни модели със следните променени параметри:

- 1) температура на нагриване на заготовките 850°C и 550°C;
- 2) с ъгъл между зоните в канала на матрицата 160°;
- 3) с коефициент на триене между валците 0.7 (което съответства на изкуствено създадена повърхност с груба насечка);
- 4) с коефициент на триене в матрицата от 0.05 (който съответства на смазване при използване на полирана повърхност);
- 5) с дължини на първия канал в матрицата 80mm и 60mm.

Анализът на данните от моделите показва, че такива фактори, като ъгълът между участъците на матричния канал и температурата на нагриване на заготовките имат значителен ефект върху разпределението на напреженията и натрупаната деформация в целия обем на заготовката при прилагането на ко-процеса.

А промяната на стойностите на коефициента на триене и дължината на каналите в матрицата (в границите на допустимите стойности) не променят съществено параметрите на НДС за дадения комбиниран процес.

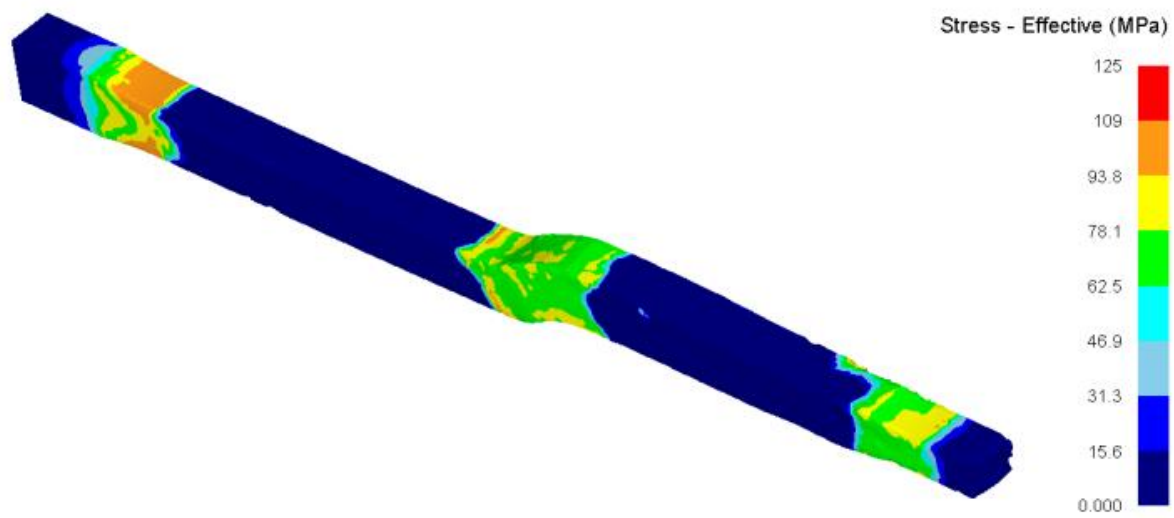
За да се направи оценка на ефективността на използването на хоризонтални и вертикални валци чрез изследване на напрегнатото състояние, беше решено да се използва коефициент Lode-Nádai. Този коефициент позволява да се оцени естеството на деформация в конкретната точка (опън, натиск или срязване). Коефициентът на Lode-Nádai се изчислява по формулата:

$$\mu = 2 \cdot \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1 \quad (4)$$

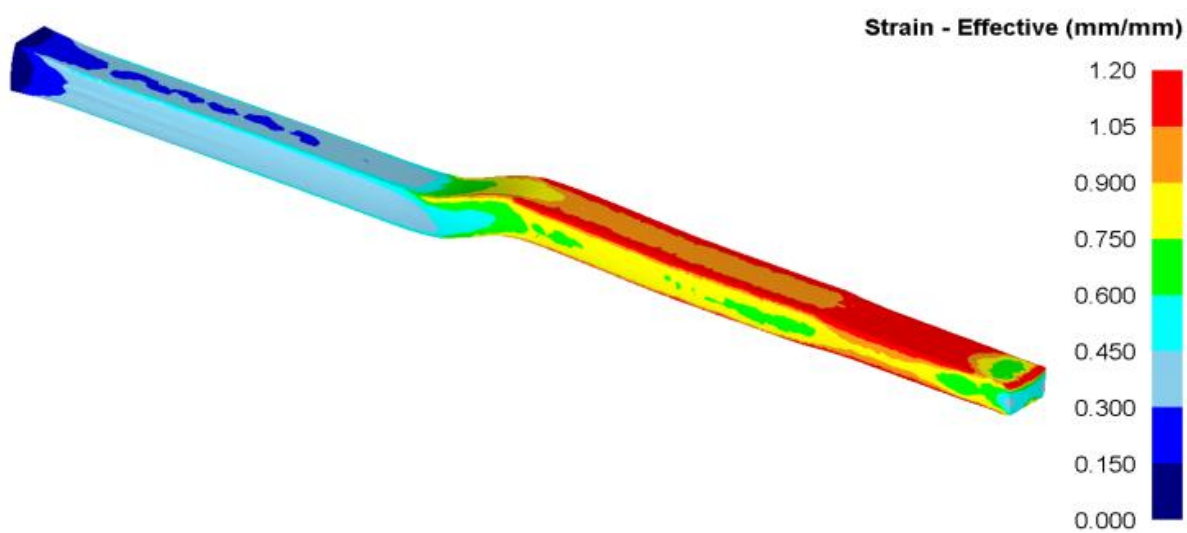
Големината на коефициента варира от -1 до 1. Стойност между 0 и 1 съответства на натиск; от 0 до -1 съответства на опън; коефициент, със стойности около 0, съответства на срязване.

Условно, заготовката се разделя на следните области:

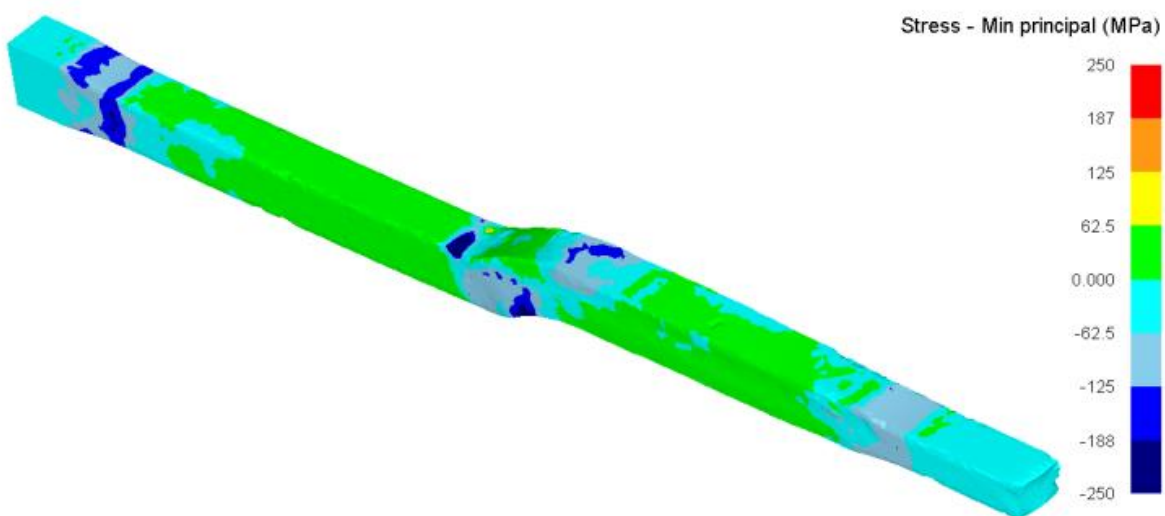
- 1) зона на валцуване в първата двойка валци;
- 2) разстоянието между зоните на валцуване в първата двойка валци и стиковите на каналите в матрицата;
- 3) зона между стиковите в матрицата;
- 4) разстоянието между зоните на канали в матрицата и валцуването във втората двойка валци;
- 5) зона на валцуване във втората двойка валци.



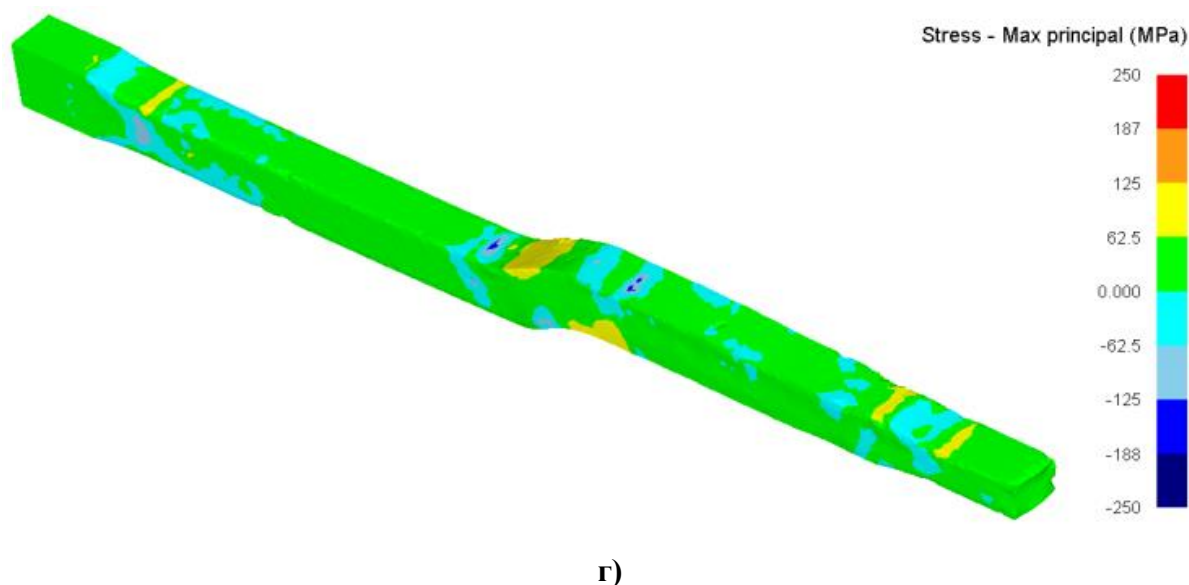
a)



b)



B)



Фиг. 2 - Изследваните параметри на напрегнато-деформационното състояние

При изчисляване на коефициента Lode-Nádai, резултатите в първите три зони са напълно идентични. В първата зона по време на валцуването присъстват както зона на натиск ($\mu = 0,6 \div 0,9$), така и зона на опън ($\mu = -0,6 \div -0,8$), което е резултат на особеностите на формирането на огнището на деформация по време на валцоване, в което има зони на изоставане и изпреварване.

Подобни резултати са получени и в последната зона (при валцуването във втората двойка валци).

Във втората зона, по цялата ѝ дължина присъства натиск ($\mu = 0,95 \div 1$), което е следствие от противоналягането в наклонения канал на матрицата. В третата зона, при преминаване на заготовката през каналите на матрицата, има два вида деформация: натиск ($\mu = 0,6 \div 0,85$) и срязване ($\mu = 0 \div 0,2$), което е най-благоприятната схема за раздробяване на изходното зърно.

Най-интересни са стойности на коефициента Lode-Nádai, получени в четвъртата зона (разстоянието между зоните на канала в матрицата и валцуването във втората двойка валци). Тук стойностите на Lode-Nádai коефициента при използването на хоризонтални и вертикални валци значително се различават. Това се дължи на кинетиката и формирането на метала в контакт с втората двойка валци. При наличието на втора двойка хоризонтални валци заготовката получава повторна деформация по височина, при това необходимата стойност за стабилно протичане на процеса е значително по-малка, отколкото в първата двойка валци. В следствие на това заготовката получава значително по-малко уширение.

В резултат на това в четвъртата зона се развива главно опън ($\mu = -0,6 \div -0,8$), който е отрицателен фактор. В присъствието на втора двойка вертикални ролки заготовката получава втора деформация по ширина,

големината на която е съизмерима с намаляване в първата двойка валци. Вследствие на това, в четвъртата зона има подпирание от страна на валците, като по този начин напреженията на опън са значително намалени, даже до настъпването на зони на натиск ($\mu = -0,3 \div 0,3$).

При анализа на деформираното състояние е установено, че поради промяната в посоката на деформация във вертикалните ролки, значително се повишава проработваемостта на метала, поради което и стойността на еквивалентната деформация се увеличава от $1.0 \div 1.2$ в хоризонталните ролки до $1.1 \div 1.35$ в вертикалните ролки.

Специализиран софтуер за бази данни Matilda е използван за изследване на развитието на микроструктурата. Тази програма е инструмент за симулация на физико-химични процеси, протичащи в деформирания метал и е модулна надстройка към програмата Simufact. В проучването на развитието на микроструктурата в базовия модел, като изходен размер е приет среден диаметър на зърната от 40mkm. След третия проход, средният диаметър на зърното в повърхностната зона при използване на хоризонтални валци е 6mkm, в централната зона - 11mkm, т.е., разликата беше 5mkm. При използване на вертикалните ролки размерът на зърното в зоната на повърхността е 5mkm, в централната зона – 8mkm, т.е., разликата е само 3mkm.

По този начин, в резултат на изследването на много етапната деформация беше установено, че с увеличаване на броя на проходите (деформациите) се постига не само общо намаление на средния диаметър на зърното, но също така - и постепенно изравняване на този параметър между централните и повърхностни слоеве на метала.

Четвъртата глава е посветена на лабораторни изследвания на експерименталния агрегат за прилагане на ко-процеса. За тази цел е конструирана експериментална конструкция на равноканална многозонна матрица, а на базата на станове Дуо-200 и Дуо-250 е комплектована уснатовката за реализиране на ко-процеса „валцуване-РКЪпресуване“, съдържаща две валцови клетки и матрица, разположена между тях (Фиг. 3).

Първоначалното тестване на инсталацията се извърши чрез деформиране на оловни проби, при което се изследва уширението на метала като важен параметър при използването на гладки валци. Резултатът е формула (5), която позволява да се изчислява стойността на изменението на уширението при осъществяването на ко-процеса.

$$\Delta b = K \left(1 + \frac{\Delta h}{h_0} \right) \left(f_Y \cdot l_d - \frac{\Delta h}{2} \right) \frac{\Delta h}{h_0} \quad (5)$$



Фиг.3. Експерименталната инсталация

Също така, бяха определени и стойностите на коефициента на корекция, който отчита влиянието на съпротивлението в матрицата. В опитите бяха определени стойностите на коефициента за ъгли между зоните на канала $135 \div 155^\circ\text{C}$. Стойностите на коефициента за ъгли извън този диапазон, могат да се определят чрез екстраполация.

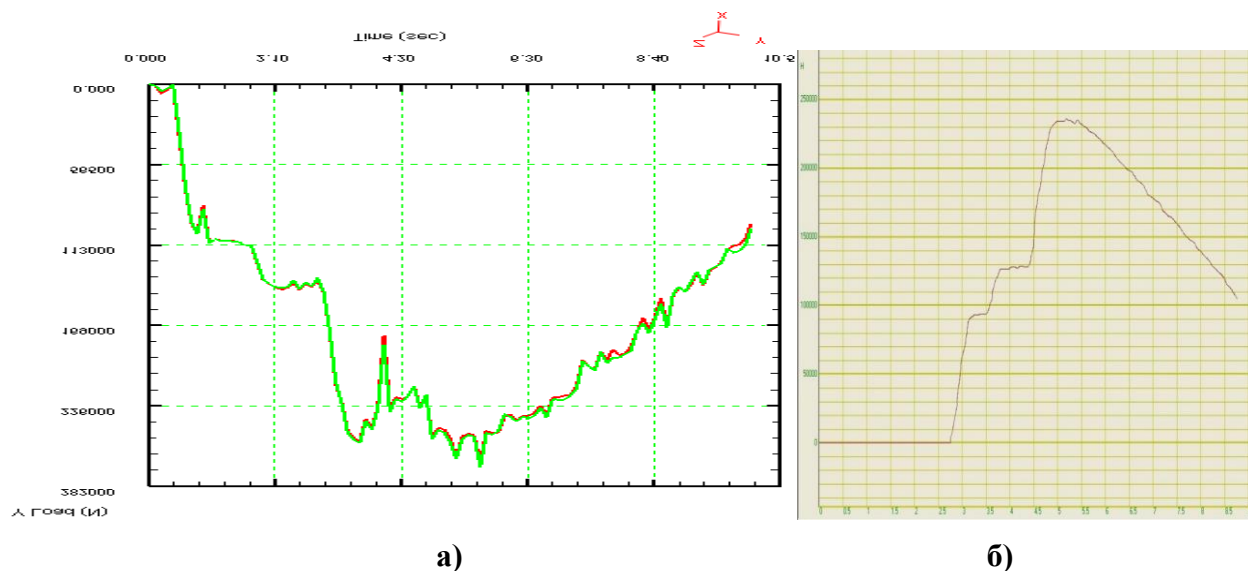
За проучване на енерго силовите параметри на процеса бе използван тензометричен метод. За да се определи мястото на фиксиране на тензорезисторите върху матрицата, се проведе предварителен якостен анализ.

Изследването на еластичната деформация показва, очаквано, най-висока стойност в участъците от повърхността в близост до стиковите на зоните на канала. Максималната стойност на линейно отклонение достига 0.019mm , което е пренебрежимо малко и позволява да се утвърждава, че конструкцията има достатъчна коравина и е подходяща за изследвания на ко-процеса.

Минималната стойност на коефициента на безопасност е 5,2 при общо ниво на граница на безопасност в най-натоварените зони 35-40. Както е известно, коефициентът на безопасност в металургичната техника е обикновено 5. Може да се твърди, че конструкцията на матрицата е подходяща за създаване на експериментална установка за ко-процеса.

В резултат на изчисленията бе определено мястото на монтаж на тензометричните сензори за измерване на усилията на деформация. Координатите на определените точки са на разстояние 75mm от предния край на централния сегмент, където има максимални линейни измествания.

Преди изучаването на енерго-силовите параметрите на процеса, първоначално се извърши проверка на резултатите от изчисленията за якост. С тази цел се измерваха усилията в процеса на пресуване на хидравлична преса (фиг.4).



Фиг.4 – Сила при РКЪпресуване:
а) – моделиране в DEFORM; б) - експеримент

Решено бе да се възпроизведе граничен случай на пресуване (когато височината и ширината на заготовката съответства на височината и ширината на канала на матрицата), който бе използван и при якостните изчисления. Пресувани бяха заготовки от стомана марка 45, нагрети до 700°C. Размерът на заготовките е 9.5x39x90mm. Графиките на изменение на усилията са дадени на фиг.4.

Тези графики са характерни за ко-процес в матрица с успоредни канали. Ясно се очертават три хоризонтални и един наклонен участък. Първата хоризонтална част съответства на момента, когато заготовката преминава през първата зона на каналиа. Тук, стойността на силата на пресуване достига 90-95kN. При моделирането е получена сила на пресуване в този участък 110kN, т.е., разликата е 13,6%.

Вторият хоризонтален участък съответства на момента, когато заготовката преминава през втория преход в наклона на канала. Тук е измерена сила на натиск 125-130kN. Изчислената стойност на силата за този участък е около 140kN, т.е., разликата е 7.2%.

След този участък рязко нараства силата на пресуване, което е свързано със запълването на целия обем на матрицата. След запълването на канала, процесът на пресоване се стабилизира (третата хоризонтална част). Тук, стойността на силата достига 235kN. Изчислената стойност е 260kN, т.е.,

разликата е 9,6%. Намалването на силата на наклонената крайна част характеризира края на процеса на пресоване, когато заготовката излиза от първия канал. Началото на отклонението от хоризонталното положение съответства на момента, когато задният край на заготовката преминава през зоната на тензометричните сензори.

В хода на съпоставяне на данните, беше отбелязано, че експерименталните стойности на резултатите са в много добро съответствие с резултатите от компютърната симулация. Максималната грешка е не повече от 14%, което показва както високата точност на разработения компютърен модел, така също и правилното място на монтажа на тензосензорите и правилното им калибриране.

След успешната проверка на резултатите от изчисленията на якостните показатели и на адекватността на модела, потвърждаването на правилното прикрепване на тензодатчиците и правилното му калибриране, матрицата със сензорите бе монтирана на експерименталната установка (фиг. 5).



Фиг.5 – Измерение на усилията при ко-процеса „валцуване-РКЪпресуване“

Тук, на мездозите на първата клетка бяха инсталирани тензодатчици за измерване на силата на валцуване. Силата на валцуване се измерва само в първата клетка, тъй като този параметър, според концепцията за процеса е ключов - силата трябва да превишава силата на пресуване в ко-процеса.

Беше решено да се извършат два експеримента: деформиране на заготовки от алуминий и мед. В качеството на изходни материали бяха използвани: алуминиева сплав 6063 (аналог на алуминиевата деформирана сплав AD31) и M1 медна сплав (чиста техническа мед). И двата материала са деформирани при стайна температура. Този избор на материали се дължи на два фактора:

1) бяха взети алуминий и мед, за да се изучава процеса на въздействие на процеса върху различни по природа материали;

2) Алуминиевите заготовки са от сплав със значителен дял от различни добавки, а медта - под формата на технически чист материал - за да се определи влиянието на процеса върху формирането на структурата и механичните свойства в зависимост от степента на чистота на материала, който се изучава.

От тези материали са произведени заготовки с идентични размери: 15x25x450mm. Заготовките бяха валцувани в първата клетка до дебелина 9mm. Във втората клетка заготовките се деформираха до дебелина 7mm. Дължината на заготовките е избрана така, че предният край на заготовката влиза във втората двойка валци, а задният край на този етап все още се валцува в първата клетка.

При анализа на резултатите от измерванията на усилията по време на ко-процеса се установи следното:

1) и при алуминиевите и при медните заготовки графиките на валцуване и пресуване имат сложен характер, различаващи се само в абсолютните стойности на силата. Това се дължи на факта, че геометричните параметри остават непроменени в двата експеримента;

2) естеството на графиките на силите на валцуване (фиг. 6а) има подобна структура с графика на усилията на обикновено надължно валцуване. Кривата на силата от нулевата стойност първоначално се устремява стръмно нагоре (етап на захващане на метала от валците) до определено ниво, където тя има относително хоризонтален характер (етап на валцуване), след което рязко се спуска надолу до нула (изход на метала от валците).

В случай на комбиниран процес, в графиката, вместо един хоризонтален участък, има три последователни етапа. Първият етап е характерен за «чисто» валцуване. Вторият етап съответства на преминаването на първия стик на каналите в матрицата. Тук, поради наличието на обратно налягане, произтичащо от стените на матрицата, натискът върху валците се увеличава.

Съответно, третата стъпка характеризира силата на валцуване с противоналягане в двата стика на каналите в матрицата. Това е желателно съпротивление, стойността на което трябва да превишава максималното съпротивление в канала;

3) естеството на графиките на усилията на пресуване (фиг. 6б) има подобна структура на графиката на обикновения ко-процес, показана на фиг. 4б. Разлика възниква само в дясната част. Тук, вместо монотонен наклон на линията, нарушаван на определено ниво, кривата на усилията клони към нула, образувайки малка стъпка. Тази разлика се обяснява с промяна в принципа на ко-процеса. При пресуване на заготовки на преса, последната се деформира от пуансона, чийто ход е много ограничен. В края на работния ход на инструмента, металът остава в матрицата. В резултат на това, при прекратяване на движението на пуансона силата пресуване не достига нула и графикът прекъсва. При ко-процеса става пълно отстраняване на детайла, новият характер на кривата след достигане на максимума характеризира излизането на задния края на метала от тензорезистора, като началото на последния етап съответства на изхода на заготовката от първия канал на матрицата;

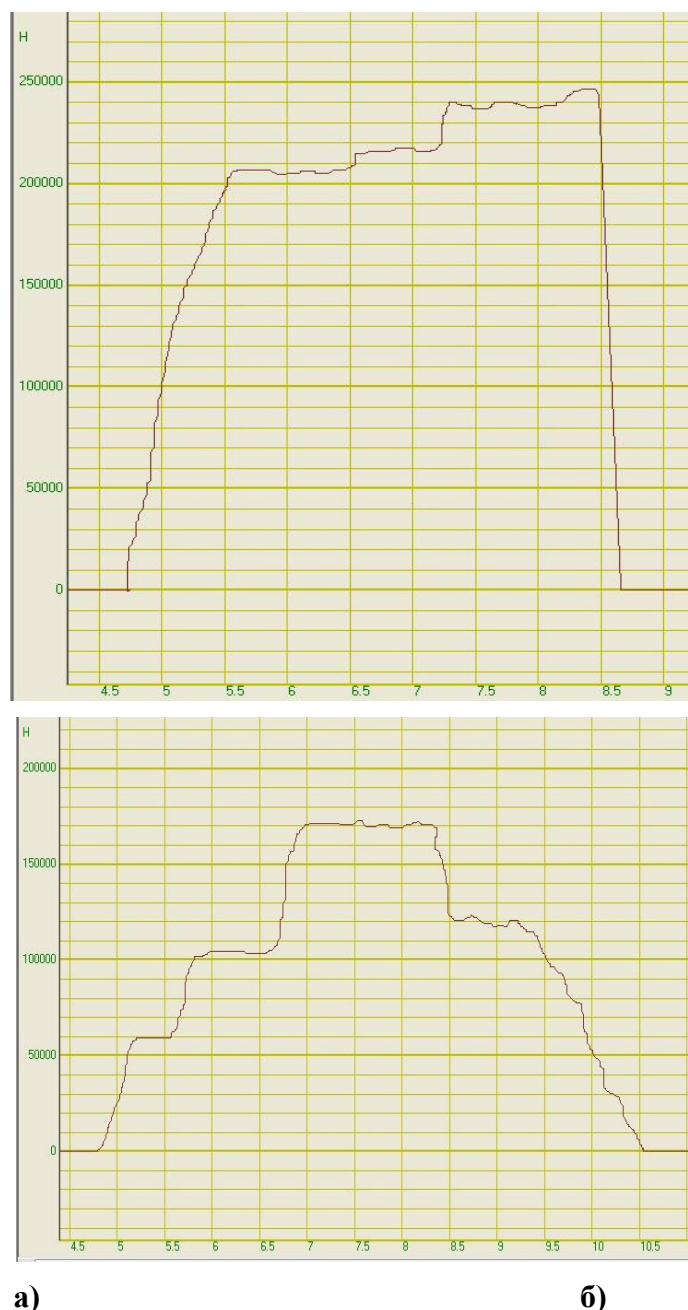
4). данните от измерването на усилията са обобщени в Таблица 1. Също така беше определена разликата между стойностите на силите при валцуване и пресуване. В този случай, разликата характеризира нивото на запас от активните сили на триене. Тази стойност се изчислява по формулата:

$$\Delta = \left(\frac{P_{ROLL}}{P_{PRESS}} - 1 \right) \cdot 100\% \quad , \quad (6)$$

където:

P_{ROLL} – силата на валцуване в първата клетка;

P_{PRESS} – противосилата в матрицата.



Фиг.6. Изменение на силите на деформация на алуминиева сплав 6063
а- валцуване в първата клетка; б–пресуване в матрицата

Сравнителният анализ на усилията на деформация показва, че силата на валцуване и в трите фази превишава стойностите на съответстващите сили на пресуване, което е необходимо условие за реализирането на ко-процеса. При това резервът от активни сили на триене в първата клетка съществено намалява с предвижването на заготовката през каналите на матрицата. Също така е отбелязано влиянието на типа на деформируемия материал върху големината на силите на деформация и на резерва от сили на триене. При по-голямо съпротивление срещу деформация на материала (в нашия случай "алуминий → мед" абсолютните стойности на силите на валцуване и пресуване се увеличават, а общото ниво на резерва от активни сили на триене се намалява.

Таблица 1 – Резултати от измерването на силите на деформация

	1-и етап	2-и етап	3-и етап
Алуминиева сплав 6063			
Етап валцуване, kN	205	217	242
Етап пресуване, kN	59	104	172
Разлика, %	247	108	40
Медна сплав М1			
Етап валцуване, kN	254	267	294
Етап пресуване, kN	83	118	196
Разлика, %	206	116	50

Глава пета е посветена на експериментално изследване на влиянието на ко- процеса на деформация върху развитието (изменението) на структурата и механичните свойства на заготовките от алуминий и мед. Беше решено да се извършат три цикъла на деформация, в съответствие с резултатите от компютърната симулация:

- първи цикъл: заготовка с дебелина 15mm се валцува до дебелина 10mm в първата двойка валци, преминава през матрица с височина на канала 10mm и след това се валцува до дебелина 9mm във втората двойка валци. След първия цикъл, напречното сечение на заготовките е с размери 9x28.7mm;

- втори цикъл: заготовка с дебелина 9mm се валцува с абсолютна деформация 2mm в първата двойка валци, преминава през матрица с височина на канала 8mm и допълнително се валцува с абсолютна деформация 1mm във втората двойка валци. След втория цикъл размерите на напречното сечение на заготовката бяха 7x30.4mm;

- трети цикъл: заготовка с дебелина 7mm се деформира с 2mm в първата двойка валци, преминава през матрица с височина на канала 6mm и след това се деформира с 1mm във втората двойка валци. След третия цикъл напречното сечение на заготовката е 5x32.2mm.

За експериментите по горе изложения план са допълнително направени два комплекта от сегменти за централната част на матрицата. Ъгълът на стикване на каналите е 140 градуса, ширината на канала е 40mm, а височината на канала е 8mm и съответно 6mm.

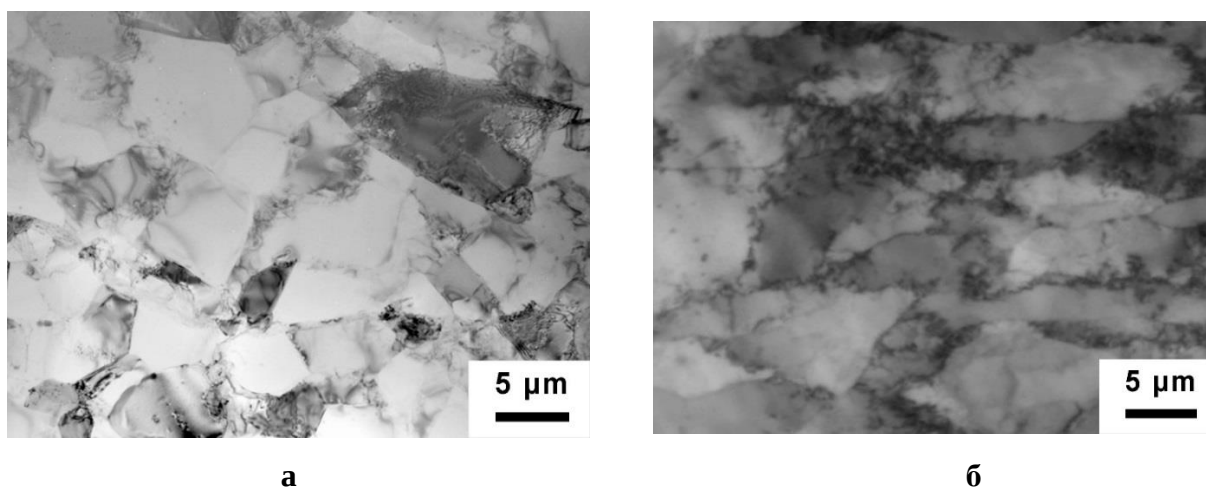
Тъй като валцовият блок позволява да се инсталира само една матрица, то след всеки цикъл на деформация на двата материала, се прави смяна на централните сегменти на матрицата.

В допълнение към реализираните цикли на деформация по изучавания ко-процес, за бъдещ сравнителен анализ се извърши паралелно РКЪпресуване на хидравлична преса. Като средство за деформиране се използва матрицата за първия цикъл (с височина на канала 10mm).

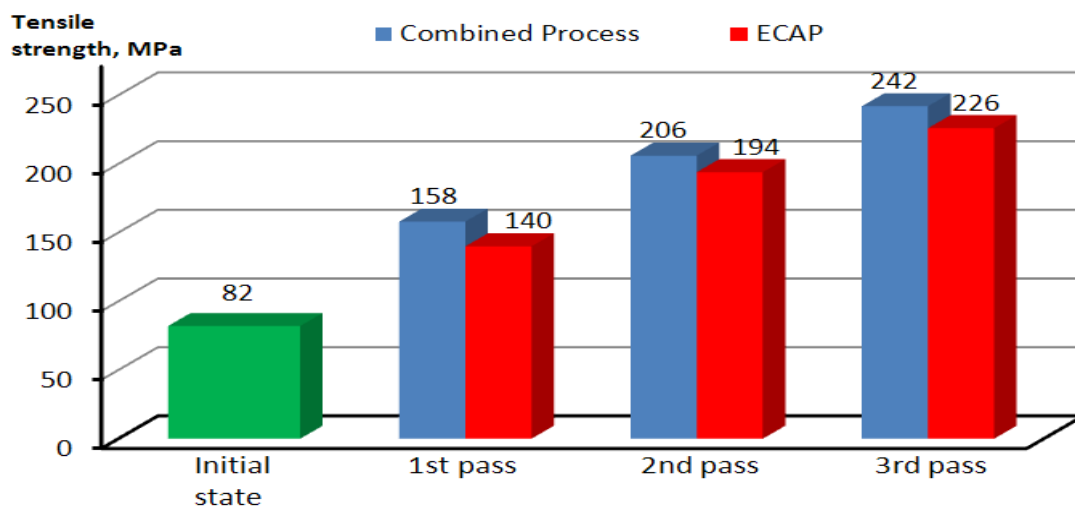
Микроструктурните изследвания на алуминиевите образци, деформирани по ко-процеса показваха, че в първоначалното състояние алуминиевата сплав 6063 има едрозърнеста структура със среден размер на зърната 110 μm . След третия цикъл размерът на зърната на алуминия намалява до 5 μm (Фиг. 7). В структурата има значително увеличаване на дела на голямоъгълните граници благодарение на процесите на динамично възстановяване и рекристализация. Това се дължи на факта, че с намаляване на размерите на зърното температурата на началото на рекристализация намалява. Границите на зърното станат по-ясни.

При изследването на механичните свойства (фиг. 8) се установи, че сплав AL6063, деформирана по ко-процеса, очаквано, увеличава якостните параметри на метала, което съответства на уравнението на Хол-Петч, а пластичните показатели намаляват. Например, границата на пластичност на метала, деформиран в три цикъла, се увеличава 3.7 пъти; якостта на опън се увеличава 3 пъти, а относителното удължение намалява 1,8 пъти.

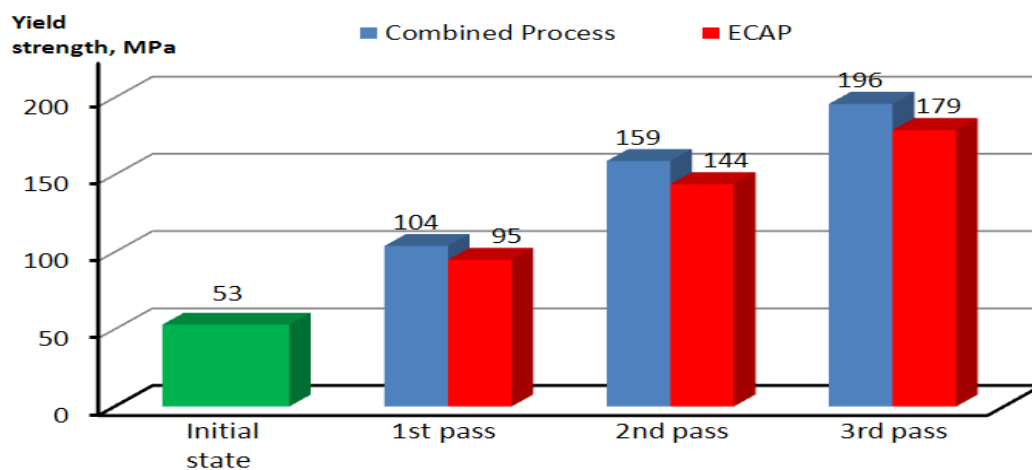
При изследването на медните заготовки беше установено, че в първоначалното състояние, медта има доста груба структура с голямо присъствие на двойници и има среден размер на зърното около 90 микрона. След третия цикъл структурата на медта издребнява до 2 микрона (фигура 9). В структурата има значително увеличаване на дела на голямоъгълните граници поради подобро динамично възстановяване и прекристализация. В напречно сечение микроструктурата е хомогенна, с равноосни зърна. В надлъжен разрез зърната имат продълговата форма, която е следствие от пластичната деформация.



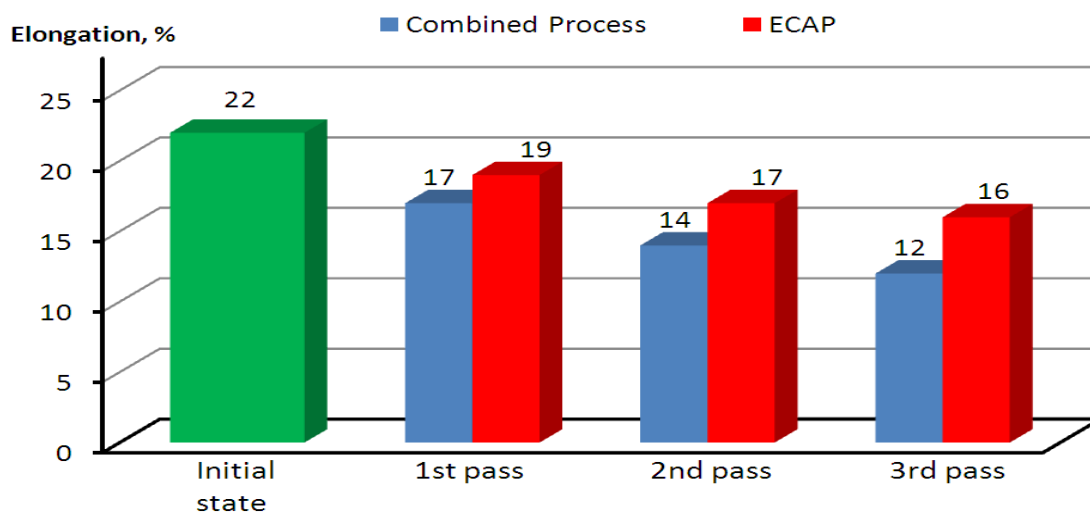
Фиг. 7 - Микроструктура на сплав AL6063 след 3 цикъла на деформация
а) – напречно сечение; б) – надлъжно сечение



а)



б)



в)

Фиг. 8. Механични свойства на сплав AL6063 в зависимост от циклите на деформация
 а) – граница на якост; б) – граница на пластичност; в) - относително удължение

При изследването на механичните свойства (фиг. 10) се установи, че при деформацията на медна сплав М1 по ко-процеса също се увеличават якостните свойства на метала, а пластичните свойства са намалени. Например, границата на пластичност след 3 цикъла на деформация се увеличава 2.04 пъти, якостта на опън се увеличава до 2.05 пъти, а относителното удължение намалява с 44%.

Като цяло, след три цикъла на деформация крайният размер на зърната от изследваните материали достига стойност от 2-5mkm, което е недостатъчно за получаване на УДС структура. Да се реши този проблем може по два начина: чрез увеличаване на броя на проходите (деформациите), или чрез въвеждане на допълнителни режими на предварителна термична обработка.

При реализиране на още един цикъл на деформация на обработваемото изделие крайната дебелина ще бъде около 2mm, които рязко намалява неговата приложимост. Ето защо, въвеждането на допълнителни видове предварителна термична обработка е най-оптималното решение в случая.

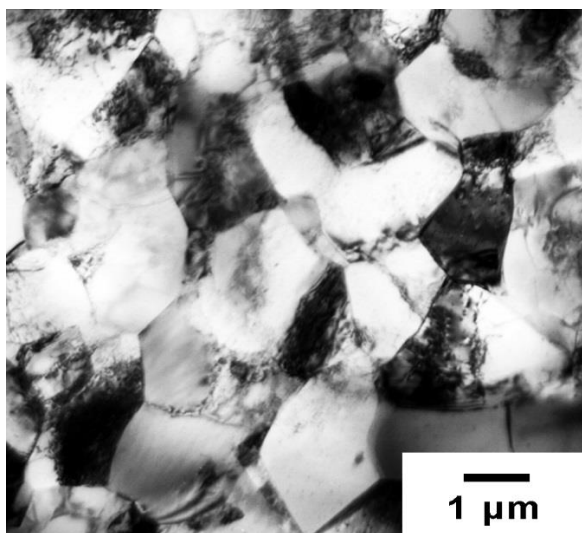
Беше избран следващият режим на термична обработка на алуминиевата сплав 6063, предназначена да се деформира по ко-технологията:

- 1) хомогенизиращо отгряване при 600°C за 15 минути, последвано от охлаждане в пещта;
- 2) закаляване с нагряване при 520°C, задържане 15 минути и бързо охлаждане във вода;
- 3) нагряване до 100°C преди всяко деформиране.

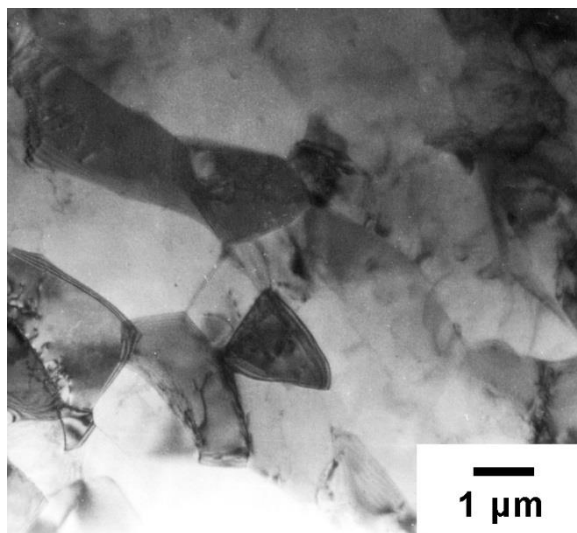
Предложеният режим за предварителна термообработка е ефективен начин за получаване на УДС структура алуминиева сплав 6063 при изследвания ко-процес.

В напречното сечение микроструктурата, както и след пълно отгряване, представлява натрупвания на равноосни зърна с голямоъгълни граници. Обаче, в случая, прилагането на новия режим с предварителна термична обработка се отразява благоприятно върху окончателния размер на зърното. По този начин, средният размер на зърното е около 0,9-1mkm, като някои зърна имат дължина 700-800nm (фиг. 11a).

В надлъжен разрез размерът на зърната също така намалява значително - някои зърна имат дължина 600-700nm, и средният размер на зърното е около 0.9-1mkm (фиг.11 б). Както и при пълно отгряване, тук може да се наблюдава леко удължаване на зърната, но след прилагане на избрания режим, а също така включвайки и закаляване, зърното се удължава не толкова силно - отделните зърна имат същата равноосна форма, както на напречното сечение.

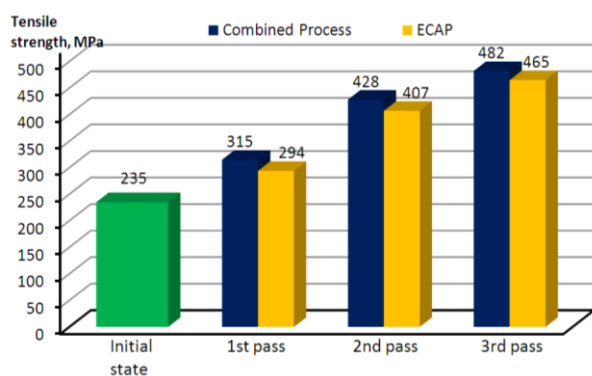


а

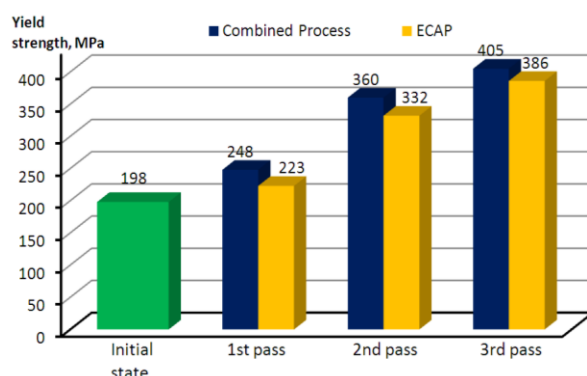


б

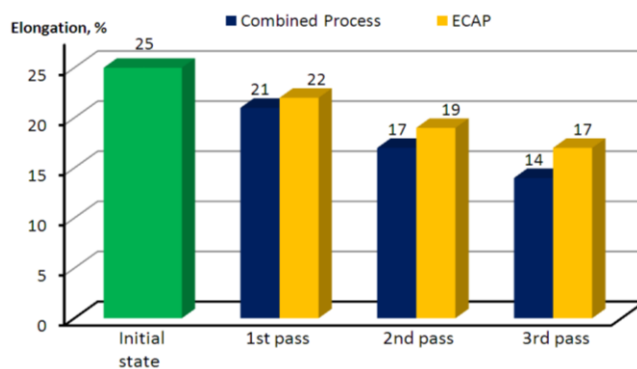
Фиг. 9. Микроструктура на сплав М1 след 3 цикъла на деформация
а) – напречно сечение; б – надлъжно сечение



а

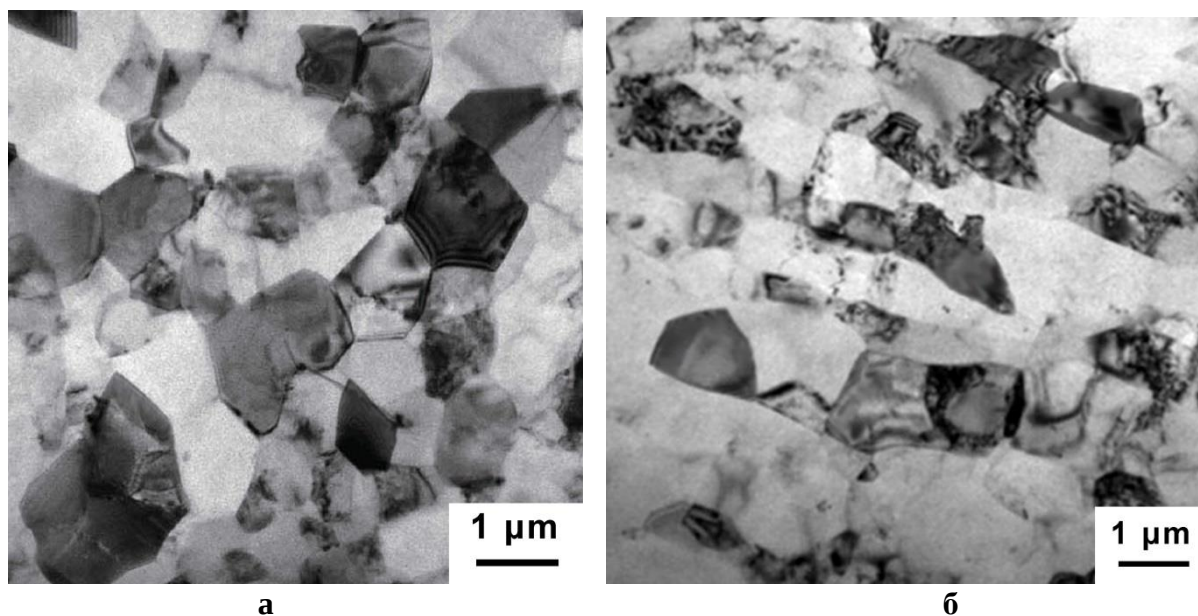


б



в

Фиг. 10. Механични свойства на сплав М1 в зависимости от циклите на деформация
а) – граница на якост; б) – граница на пластичност; в) - относително удължение



**Фиг. 11. Микроструктура на сплав AL6063 след предварителна термообработка по избрания режим и след 3 цикъла на деформация
а)– напречно сечение; б) - надлъжно сечение**

Ефектите на различните термични обработки върху структурните промени при медна сплав М1 не бяха стабилни. Затова беше взето решение да се изследва влиянието на различни режими на термична обработка, за да се определят оптималните. Изследваните режими на термообработка са представени в Таблица 2.

Промените в структурата на медта след ко-процеса бяха изследвани на микроскоп (фиг. 12-13).

Тези проучвания показват, че по време на предварителното нормализиране и закаляване, структурата на медта след три цикъла на комбинирания процеса "валцуване - РКЪпресуване" е подобна на структурата, получена след предварително отгряване. В напречното сечение микроструктурата е с равноосни зърна с голямоъгълни граници. Средният размер на зърната е 1,5-2μm. Подобен размер на зърното е получен и в надлъжния разрез на медта. Както във всички предишни случаи, микроструктурата има малко по-издължени зърна.

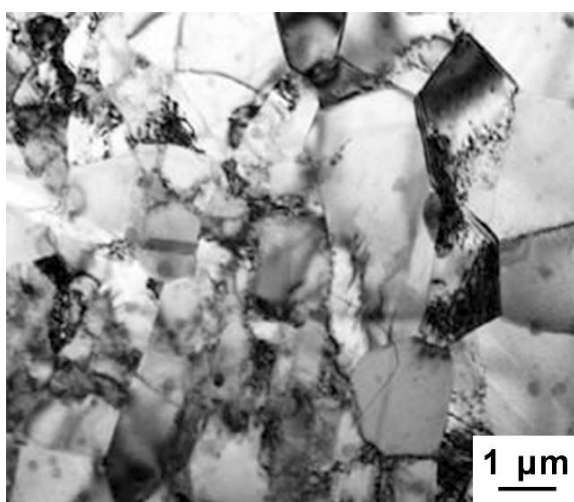
Така, по резултатите от изследванията на влиянието на различните схеми на термообработка върху структурните промени в медната сплав М1, беше установено, че предварителната термообработка не влияе значително на размера на зърната, получени при интензивната пластична деформация.

Използвайки методите на квалиметрията, са получени комплексни показатели за качеството на заготовките от алуминиева сплав 6063. Сравнението на тези показатели доказва предимствата на предлаганата комбинирана технология „валцуване – РКЪпресуване“ в сравнение с конвенционалното равнокалибрено ъглово пресуване (РКЪП). Също така са

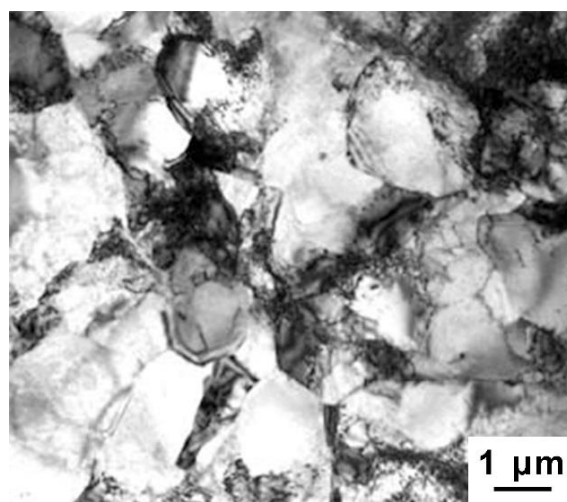
получени регресионни уравнения, адекватно описващи зависимостта на комплексния показател на качеството на заготовките от броя на циклите на деформация.

Таблица 2 – Режими на термообработка на медта

Вид термо- обработка	Температура, оС	Продължителност на задържане, min	Среда на охлаждане
Нормализация	600	16	на въздух
Закаляване	700	16	във вода



а)

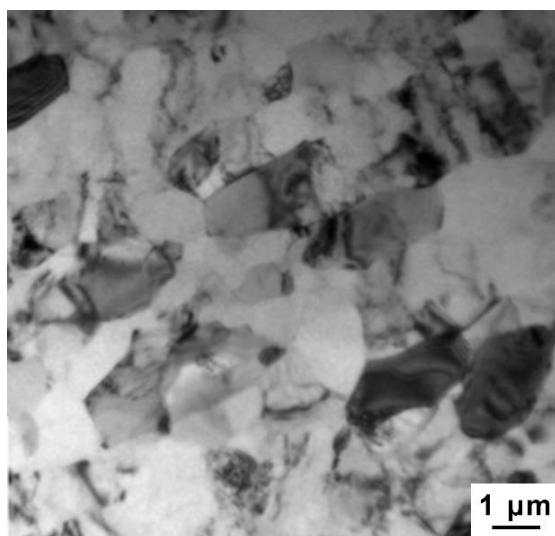


б)

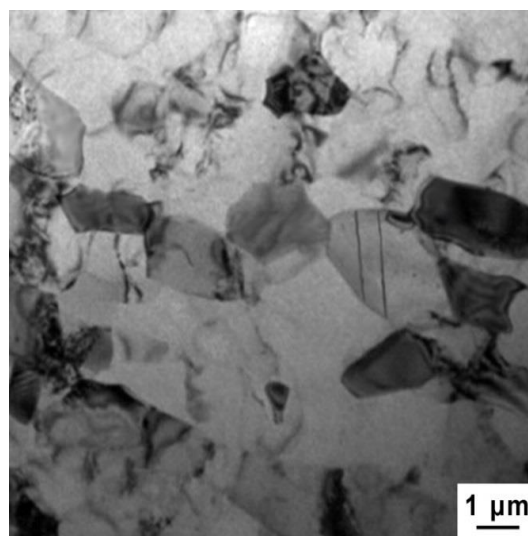
Фиг. 12. Микроструктура на сплав М1 след три цикъла на деформация.

Напречно сечение:

а) – закалка ; б) – нормализация



а)



б)

Фиг.13 - Микроструктура на сплав М1 след три цикъла на деформация.

Надлъжно сечение:

а) – закалка; б) – нормализация

ОСНОВНИ ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ

1. Подобряване на експлоатационните характеристики на деформирания метал може да се осигури чрез образуването на ултрадребнозърнеста структура (УДС). Перспективно е развитието на идеята за разработване на нови схеми за деформация на металите и сплавите, където се реализира схема на чисто срязване. Обаче, реализацията на методите на деформация за получаване на изделия с УДС в индустрията изисква разработването на нови технически решения.
2. Актуална е и задачата за създаване на нови технологии за производство на дълги изделия с по-високи механични свойства.
3. Разработен е нов метод на деформация "валцуване – равнокалибрено ъглово пресуване", различаващ се от съществуващите технологии на пресуване с това, че става възможно да се осигури непрекъснатост на процеса на деформация и да се отстраняват ограниченията по размерите на изходните заготовки (по този способ са защитени технологии и конструкции и получени следните патенти на Република Казахстан: N23802; N25862; N25863; N27262).
4. Получени са теоретични зависимости за определяне на силата на съпротивление в равно-каналната матрица при преминаването на метала през нея, дължащи се на активните сили на триене, генерирани от калибрите и гладките валци.
5. Реализирано е изследване на условията при използване на гладки и калибрирани валци при изпълнението на комбинирания процеса на "валцуване - РКЪпресуване". Установено е, че използването на калибрирани валци (при еднакви първоначални параметри) позволява ко-процесът да се реализира с по-малък ъгъл на стиковка на каналите в матрицата при значително по-малка деформация.
6. Кинематичните изчисления показват, че ключов фактор за непрекъснатостта на процеса е диаметърът на втората двойка валци, чрез вариране на стойностите на който може да се постигне оптимална скорост на валците.
7. Извършено е моделиране на ко-процеса с използване на гладки и калибрирани валци, както и на комбинации от хоризонтални и вертикални ролки (валци) на изхода от матрицата и е установено, че фактори като ъгълът на стиковане на каналите в матрицата и температурата на нагряване на заготовката имат значителен ефект върху разпределението на напреженията и натрупаната деформация. В същото време, изменението на стойностите на коефициента на триене и дължината на каналите в матрицата (в границите на допустимите стойности) няма съществено влияние върху параметрите на напрегнато-деформационното състояние (НДС) на метала.
8. Конструираното лабораторно съоръжение бе тествано чрез деформиране на оловни проби, за да се проучи уширението на метала като ключов параметър при използването на гладки ролки. В резултат на това изследване

е получена формула за изчисляване на уширението при ко-процеса. Също така, са определени стойностите на коефициента на корекция, който отчита влиянието на съпротивлението в матрицата.

9. Използвайки тензометрични методи, бяха изследвани енерго-силовите параметри на комбинирания процес. Анализът на резултатите от измерванията показват, че силата на валцуване при деформация на алуминий и мед са по-големи от съответните стойности на силата на пресуване, което е необходимо условие за реализирането на интегрирания процес. При това, резервът от активни сили на триене в първата клетка при предвижването на заготовката през каналите на матрицата намалява значително.

10. Изследвани са механичните свойства и микроструктурата на заготовки от алуминиева 6063 и медна М1 сплави след деформация по разработения комбиниран процес и конвенционалния РКЪП (равнокалибрено ъглово пресуване) и е установено, че новият комбиниран процес „валцуване – РКЪПресуване“ има неоспорими предимства пред РКЪП за по-интензивното издребняване на зърното на метала и за получаване на по-високи механични характеристики на деформирания метал.

11. Изследвано е също така и на влиянието на различни предварителни режими на термообработка (ТО) (отгряване+закалка) върху микроструктурата и е установено, че предложеният режим е ефективен начин за получаване на УДС структура в алуминиева сплав 6063. Използването на този режим на ТО, съчетано с реализирането на три цикъла на комбинирания процес, позволява да се постигне размер на зърната 600-800nm. В същото време, е установено, че предварителната ТО на медната сплав М1 позволява да се получи среден размер на зърната от 1,5 – 2mkm, което означава, че различните режими на предварителна ТО имат незначително влияние върху структурните промени в медната сплав, деформирана по комбинирания процес.

12. С използването на методите на квалиметрията са получени комплексни показатели за качеството на заготовките от алуминиева сплав 6063 след деформация при РКЪП и при и предложеният комбиниран процес. Сравнението на тези резултати доказва предимствата на предлаганата комбинирана технология в сравнение с конвенционалната. Също така са изведени регресионни уравнения, адекватно описващи зависимостта на комплексния показател на качеството на заготовките от броя на циклите на деформация.

13. Резултатите от дисертационните изследвания могат бъдат полезни за инженери, конструктори и други специалисти в разработването и прилагането на ефективни производствени процеси за получаване на метални изделия с УДС.

ОСНОВНИ ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИЯТА

1. **Патент РК № 25863.** Устройство для непрерывного прессования металла. Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., **Панин Е.А.** (15.07.2013 бюл №7).
2. Naizabekov, A., Lezhnev, S., **Panin, E.**, Koinov, T. Study of broadening in a combined process "rolling-pressing" using an equal-channel step die. Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2015, Vol. 50, Iss. 3, pp. 308-313.
3. **Патент РК № 23802.** Устройство для непрерывного прессования металла. Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., **Панин Е.А.** (14.09.2012 бюл №9).
4. Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., **Панин Е.А.** Теоретические исследования совмещенного процесса «прокатка-прессование» с использованием равноканальной ступенчатой матрицы. Изв. вузов. Черная металлургия, Москва, 2008, №6, с. 22-26
5. A. Naizabekov, S. Lezhnev, **E. Panin**, T. Koinov. Theoretical grounds of the combined "rolling - equal - channel step pressing" process. Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 51, 5, 2016, 594-602.
6. **Патент РК № 27262.** Устройство для непрерывного прессования металлов и сплавов. Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., **Панин Е.А.** (31.08.2016 бюл №8).
7. **Патент РК № 25862.** Устройство для непрерывного прессования металлов и сплавов. Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., **Панин Е.А.** (15.07.2013 бюл №7).
8. Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., **Панин Е.А.** Моделирование совмещенного процесса «прокатка-прессование» с использованием равноканальной ступенчатой матрицы. Труды Университета, 2008 №3, с. 16-19.
9. Lezhnev S., **Panin E.** Investigation of the Influence of Geometric and Technological Factors on the Stress-Strain State of Metal in the Implementation of the Combined Rolling-Pressing Process. Advanced Materials Research. Vol. 936 (2014) pp 1918-1924.
10. S. Lezhnev, A. Naizabekov, **E. Panin**, T. Koinov, I. Mazur, A. Arbutov. Evaluation of the effectiveness of the use of horizontal and vertical rolls in the "Rolling-pressing" process on the basis of the stress-strain state studying. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 179 (2017), Article number: 012047.

11. A. Naizabekov, S. Lezhnev, **E. Panin**, T. Koinov, I. Mazur. Development and theoretical study of new scheme of realization of combined process “rolling - pressing” using equal channel step matrix. Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 52, 2, 2017, 186-192.
12. Lezhnev, S., **Panin, E.**, Volokitina I. Research of combined process “Rolling-pressing” influence on the microstructure and mechanical properties of aluminium. Advanced Materials Research. Vol. 814 (2013) pp 68-75.
13. А. Найзабеков, С. Лежнев, **Е. Панин**, И. Волокитина. Анализ влияния инновационной совмещенной технологии деформирования «прокатка-прессование» на микроструктуру и механические свойства алюминия. Производство проката. 2014. №6. С. 29-33.
14. Naizabekov A., Lezhnev, S., Panin, E., Volokitina I. Influence of Combined Process “Rolling-pressing” on Microstructure and Mechanical Properties of Copper. Procedia Engineering. Volume 81, 2014, Pages 1499–1504.
15. Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., **Панин Е.А.**, Волокитина И.Е., Куис Д.В. Исследование эволюции микроструктуры меди при реализации совмещенного процесса «прокатка-прессование». Международный научно-технический конгресс «ОМД 2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии». 2014. с. 382-386.
16. Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., **Панин Е.А.** Теоретические и экспериментальные исследования процесса деформирования на основе совмещения прокатки и равноканального ступенчатого прессования. XVI International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering», Czestochowa, Poland, 2015, p. 192-197.
17. A. Naizabekov, S. Lezhnev, **E. Panin**, I. Volokitina. The Role of Preliminary Heat Treatment in the Formation of Ultrafine-Grained Structure in the Implementation of the Combined Process "Rolling - Equal Channel Angular Pressing". Materials Science Forum Vol. 879 (2016) pp 1093-1098.
18. Naizabekov A., Lezhnev S., **Panin E.**, Volokitina I., T. Koinov. The effect of preliminary and final heat treatment in course of the combined “rolling-pressing” process realization on microstructure evolution of copper. Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 51, 3, 2016, 315-321.

Приети съкращения:

РКЪП – равнокалибрено ъглово пресуване;
 УДС – ултра дребнозърнеста структура;
 НДС – напрегнато-деформационно състояние;
 ТО – термообработка.