<u>ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ</u>

МАШИННО-ТЕХНОЛОГИЧЕН ФАКУЛТЕТ КАТЕДРА "МАТЕРИАЛОЗНАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ НА МАТЕРИАЛИТЕ"

маг. инж. Антонио Антонов Николов

КОНСТРУКТИВНИ СХЕМИ ЗА ИНТЕНЗИФИЦИРАНЕ НА ПЛАСТИЧНАТА ДЕФОРМАЦИЯ НА МЕТАЛИТЕ ЧРЕЗ РАВНОКАНАЛНА ЪГЛОВА ЕКСТРУЗИЯ

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

на дисертационен труд за присъждане на образователна и научна степен "доктор"

София, 2016 г.

<u>ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ</u> МАШИННО-ТЕХНОЛОГИЧЕН ФАКУЛТЕТ КАТЕДРА "МАТЕРИАЛОЗНАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ НА МАТЕРИАЛИТЕ"

маг. инж. Антонио Антонов Николов

КОНСТРУКТИВНИ СХЕМИ ЗА ИНТЕНЗИФИЦИРАНЕ НА ПЛАСТИЧНАТА ДЕФОРМАЦИЯ НА МЕТАЛИТЕ ЧРЕЗ РАВНОКАНАЛНА ЪГЛОВА ЕКСТРУЗИЯ

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертационен труд за присъждане на образователна и научна степен "ДОКТОР"

област на висше образование 5. Технически науки професионално направление: 5.1 "Машинно инженерство" научна специалност: "Технологии, машини и системи за обработка чрез пластично деформиране"

> Научни ръководители: доц. д-р инж. Валентин Камбуров доц. д-р инж. Богдан Гилев

> > София, 2016 г.

Дисертационният труд се състои от увод, изложение (в пет глави), приноси, библиография и приложения. Общият обем на дисертационния труд е 187 страници, от които 26 страници са приложения. Използвани са 150 графики и 9 таблици. Цитираната литература обхваща 99 източника (книги и статии), от които 4 са на български език и 95 на английски език. Представени са 4 публикации по темата на дисертационния труд.

Номерацията на формулите, фигурите и таблиците в автореферата, както и цитираните източници, са същите като тези в дисертационния труд.

Дисертационния труд е обсъден и насочен към защита на заседание на Разширен Катедрен Съвет на катедра "Материалознание и Технология на Материалите" към Машинно-Технологичен Факултет при Технически Университет - София, проведено на 11.11.2016 г. (Протокол №2).

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 23.03.2017 от 15^{.00} часа в залата на БИЦ при ТУ-София на заседание с научно жури в състав:

проф. д.т.н. инж. Йордан Генов Генов	Председател
доц. д-р инж. Валентин Вълков Камбуров	Научен ръководител
проф. д.т.н инж. Николай Тончев Тончев	Член
проф. д-р инж. Николай Николов Дюлгеров	Член
доц. д-р инж. Божидар Стефанов Иванов	Член

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на катедра "Материалознание и Технология на Материалите", МТФ, ТУ-София, блок 3, стая 3412.

Автор: маг. инж. Антонио Антонов Николов

Заглавие: Конструктивни схеми за интензифициране на пластичната деформация на металите чрез равноканална ъглова екструзия.

Тираж: 30 бр. Печатна база на ТУ-София

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблем

Процесите на интензивна пластична деформация (ИПД) и постиганата чрез нея ултрафина микро/нано структура са обект на интензивни изследвания в академичната общност през последните години. При тези процеси целта е преди всичко изменение на механичните характеристики на металите и металните сплави без изменение размерите на деформираното тяло, което се постига чрез създаване на натисково напрегнато състояние (отрицателен сферичен тензор). Това предотвратява появата на микропукнатини и позволява достигане на значителни степени на деформация, реализирани чрез чисто плъзгане, без изчерпване ресурса на пластичност на интензивно деформирания материал. Един от найразпростанените начини за постигане на ИПД е ъгловата равноканална екструзия (РКЕ), при който зоните с интензивна деформация са локализирани между пресичащи се канали.

Различните процеси и режими на ИПД, в крайна сметка целят и довеждат до получаването на ултрафина микро/нано структура в деформиранато тяло. В следствие на тези структурни промени, металите и сплавите придобиват нови свойства (висока пластичност в съчетание с висока якост и твърдост), които представляват интерес за практиката.

Практическа полезност и приложимост

Нарастващият интерес към материали с подобрени механични показатели предизвиква ново развитие на схемите за ИПД, при което оптимизацията на деформационното пространство с помощта на съвременната компютърна техника играе важна роля. Компютърната симулация позволява да се извърши оптимизация преди да бъдат изработени физическите прототипи на инструменталната екипировка, в резултат от моделиране със специализиран софтуер. На база направения литературен обзор по темата и използвайки софтуерен продукт QForm, са разработени и описани нови кинематични схеми за реализиране на РКЕ: едноъглова, V-образна, двуъглова и нова схема за четириъглова екструзия. Направените компютърни симулации потвърдиха възможността за осъществяване на процесите РКЕ с предложените схеми.

Възможността за практическото използване на някои от получените резултати е изследвана чрез разработването на инструментална екипировка за реализиране на двуъглова и четириъглова екструзия, с помощта на която е осъществено физическо моделиране на процесите на РКЕ.

Научна значимост и новост

В настоящата работа експериментално е установено деформационното състояние при двуъглова и четириъглова екструзия, като е направена и допълнителна математическа обработка на данни за деформираното състояние, получени чрез метода на координатните мрежи при експериментално реализираните схеми за двуъглова и четириъглова РКЕ. На базата на определени чрез изпитване деформационни параметри при силно и слабо уякчаващи се среди (технически чист алуминий и оловна сплав) са изведени регресионни зависимости за апроксимиране на "аномалното" изменение на границата на провлачане и твърдостта във функция от ефективните деформации, които описват механичното поведение на деформируемия материал, като съпротивление срещу пластично деформиране на студено при РКЕ.

Апробация на резултатите от дисертацията

Дисертационният труд е апробиран в основните си части на: Конференция с международно участие "Металолеене 2014" Плевен, април 2014; The 9th International Seminar Advance Manufacturing Technologies, Sozopol, 25-30, June 2015; Международна научна конференция "70 години МТФ", 11-13 Септември, 2015, Созопол, България.

ОСНОВНО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Глава 1. Литературно проучване в областта на дисертацията

1.7. Изводи от литературното проучване по темата за интензифициране на деформациите чрез равноканална екструзия

Известните кинематични схеми за реализиране на РКЕ са характерни с разглобяема неподвижна матрица и изтласкващ поансон, подложен на натоварвания, които не винаги съответстват на якостта му, както и високо съпротивление срещу пластична деформация от повишено контактно триене.

При конструктивните решения с подвижни части се изискват по сложно или специално проектирано пресово оборудване с възможност за реализиране на няколко движения едновременно.

При познатите решения за РКЕ в местата на пресичане на каналите е възможно възникването на опънови напрежения и/или недостатъчно голям натисков сферичен тензор, в вследствие незапълването на деформационното пространство, водещо до разрушаване на материала по време на екструдирането.

Физическото моделиране по метода на координатните мрежи се прилага за експериментално установяване на деформационото състояние при РКЕ, но без извършване на допълнителна математическа обработка на получените резултати.

Интензифицирането на пластичната деформация чрез РКЕ е един от начините за издребняване на кристалитите и получаване на ултрафина и наноразмерна структура, свързана с повишаване на механичните характеристики и уякчаване на деформираните метали и сплави.

Установена е връзка между степента на деформация (брой преходи) и промяната на микроструктурата. Анализът не е възможен след голям брой преходи, защото зърната стават изключително деформирани и издребнени и е трудно, дори и невъзможно да се направи ясно разграничение на формите на отделните зърна.

1.8. Цел и задачи на дисертационната работа

Целта на представените в дисертационния труд изследвания е: създаване на нови кинематични схеми и конструкции на експериментални екипировки за ъглова РКЕ и установяване на тяхната ефективност за интензифициране на пластичната деформация на металите и металните сплави.

За постигане на целта бяха набелязани за изпълнение следните задачи:

1. Създаване на кинематични схеми за ъглова РКЕ, реализиращи идеята за намаляване на силите от контактно триене, чрез въвеждане на подвижно спрямо неподвижната заготовка деформационно пространство посредством подвижна "поансонматрица".

2. Оптимизиране на геометричните параметри на деформационно пространство за ъглова РКЕ с оглед създаване в заготовката на напрегнато състояние с натисков сферичен тензор, предотвратяващ разрушаването й в зоната на деформация.

3. Проектиране и изработване на модулна инструментална екипировка за дву- и четириъглова РКЕ, реализираща новите кинематични схеми за РКЕ.

4. Установяване на деформационното състояние при дву- и четириъглова РКЕ на новите кинематични схеми чрез физическо моделиране. по метода на координатните мрежи и чрез числено симулиране с програмния продукт за пластична деформация QForm.

5. Установяване на влиянието на "големи" степени на деформация ($\varepsilon_{eff} \ge 4$)¹ от няколкократни дву- и четириъглови РКЕ върху механичните характеристики на пробни тела от оловна сплав и технически чист алуминий, като предварителни "слабо" и "силно" уякчаващи се материали.

6. Установяване влиянието на степента на деформация при двуъглова РКЕ върху параметрите от изпитване на микро и наноидентация на пробни тела от оловна сплав и технически чист алуминий и търсене на възможности за неговото математично формализиране.

Глава 2. Методи и методики, използвани в настоящия дисертационен труд

В дисертационния труд са разгледани и използвани следните методи и методики:

Метод на координатните мрежи - един от най-разпространените методи за изследване кинематиката на пластично течение на металите, даващ пълна информация за зоната на деформация и преходните области за определяне степента на деформация при физическо моделиране на пластична деформация, с помощта на който по-късно е реализирано физическо моделиране при двуъглова и четириъглова равноканална екструзия (РКЕ).

Емпирични формули за определяне на степента на ефективните деформации при ИПД - с помощта на приведените формули са изчислени стойностите на ефективни деформации, настъпили в заготовките и са сравнени с получените чрез програмен продукт QForm.

Програмният продукт Quantor Form 2D/3D е представен, като с негова помощ подробно са изследвани процесите на РКЕ при създадените схеми на РКЕ.

Метод Subdivison - използван за математическа апроксимация на ефективните деформации, получени при физическо моделиране.

Метод на невронните мрежи за прогнозиране процеса на промяна на механичните характеристики на базата на определени силови и деформационни параметри.

Изпитване на микротвърдост по метода на Викерс и на нанотвърдост по Беркович.

Глава 3. Разработване и изследване на нови конструктивни решения и проектиране на инструментална екипировка за реализиране на РКЕ

В настоящата глава, в съответствие с темата на дисертационния труд са изложени разработените нови схеми за ИДП при РКЕ, при които след деформиране на заготовката в един преход се възстановява изходната форма на заготовката. А именно:

3.1.1 Кинематична схема за реализиране на едноъглова РКЕ.

Разработена е нова кинематична схема фиг.3.1-1 за реализиране на едноъглова РКЕ, при която деформационното пространство (5.1) се движи спрямо заготовката, а тя е подпряна от контра поансон (7), които от своя страна действа като упор на цялата матрица. Така разработената кинематична схема позволява екструдирането на заготовката да се осъществява изцяло при един преход, като е възможно изваждането и презареждането на същата, без пълно разглобяване на инструмента. За разлика от известните кинематични схеми тук липсва поансон, който е заменен от подвижна поансон-матрица (4), която е силопренасяща.

¹ В дисертацията за степента на ефективните деформации \mathcal{E}_{eff} се използват определения като "високи" и "големи" ефективни деформации - понятия които са много относителни и не точно дефинируеми. Определението "високи" степени на деформация е прието за стойности $\mathcal{E}_{eff} \ge 4$ поради проявата на "аномално" поведение на деформируемия материал по отношение на твърдостта и границата на провлачане след тази стойност, без нормално очакваното изчерпване ресурса на пластичност и съответно разрушаване. Тези стойности обаче могат да се реализират само при натисков сферичен тензор (напр. дву-, тристепенно екструдиране, пресоване с усукване, РКЕ и пр.). Поради това, съвсем условно, но с цел на еднозначност и яснота на твърденията в дисертацията се приема, че ефективните деформации $\mathcal{E}_{eff} \ge 4$ за даден материал са "високи" (естествено съвсем условно, спрямо конвенционалните методи)-



3.1.2. Кинематична схема за реализиране на "V-образна" РКЕ

Разработената нова кинематична схема (фиг. 3.1-2) за реализиране на едноъглова РКЕ, позволява с замяната на поансон-матрицата (4), да се променят изцяло параметрите на деформационното пространство, като процеса от едноъглова РКЕ, да премине във "V-образна" РКЕ. Екструдирането на заготовката се осъществява изцяло при един преход, като е възможно изваждането и презареждането на същата без пълно разглобяване на инструмента. За разлика от известните кинематични схеми тук също липсва поансон, който е заменен от подвижна поансон-матрица (4), която е силопренасяща.



калиброващия канал.

3.1.3 Кинематична схема за реализиране на двуъглова РКЕ

Разработената нова кинематична схема за реализиране на двуъглова РКЕ (фиг. 3.1-3) е базирана на два успоредни канала, изместени осово един спрямо друг на разстояние К. Тук е избран вариант с подвижна поансон-матрица и подложен контра поансон, които затваря

отдолу деформационното пространство и едновременно с това служи за упор на целия инструмент, като усигурява и самонагаждането му.



3.1.4. Кинематична схема за реализиране на четириъглова РКЕ

Разработената нова кинематична схема за реализиране на четириъглова РКЕ е базирана на три успоредни канала, изместени осово един спрямо друг на разстояние К, осигурявайки четири зони на ИПД, както и цикличност на процеса без междинно изваждане на заготовката от деформационното пространство.



Фиг. 3.1-4 Кинематична схема за реализиране на четириъглова РКЕ а) Начало на операцията 1) подвижна поансон-матрица; 2) контейнер; 3) подложна плоча; 4) неподвижна основа; 5) заготовка; 6) контра-поансон; б) Момент от екструдирането на първа заготовка, навлязла в деформационното пространство: 5.1) заготовка 1 в зоната на деформация; б) Момент от екструдирането на първа заготовка и поставяне във входния канал 10) зареждане във входния канал на заготовка 2; г) Момент от екструдиране на втората заготовка и излизане на първата през изходния калибровъчния канал 10.1) заготовка 2 в зоната на четириъглова дефомация; 5.2) заготовка 1 в калиброващия канал

3.2. Симулация на предложените нови кинематични схеми на процеса равноканална ъглова екструзия с помощта на програмен продукт Quantor Form 2D/3D

3.2.1. Симулация на процеса равноканална едноъглова екструзия

Разгледан е процесът на едноъглова равноканална екструзия и предложената нова кинематична схема (фиг.3.2-1). Разработен е виртуален 3D инструмент (фиг. 3.2-1 а), състоящ се от: контейнер (1) и контра-поансон (3), зададени да бъдат статични в програмата; подвижна поансон-матрица (2) с изрязан в нея входен и изходен канал под ъгъл 90° един спрямо друг, за реализиране на РКЕ. Във входния канал се поставя заготовката 4 (фиг. 3.2-1).



Моделирането е извършено с ъгъл на пресичане на двата канала 90°, при което има налична една зона на ИПД (фиг. 3.2-2-6 а,б).



От направените симулации и получените по аналитичен път стойности за ефективните деформации може **да заключим**, че е получено съответствие по отношение на тези стойности в деформираните образци с предложената нова кинематична схема. При така симулираната кинематична схема няма видими дефекти в заготовката и има запълване на деформационното пространство.

3.2.2. Симулация на процеса равноканална "V-образна" екструзия

Разработен е виртуален 3D инструмент (фиг. 3.2-7, а), състоящ се от: контейнер (1) и контра-поансон (3), зададени да бъдат статични в програмата; подвижна поансон-матрица (2) с изрязан в него "V-образен" канал с определени размери на деформационното пространство (фиг. 3.2-7 б), в което се поставя заготовката (4).



Целта на симулирането е да оптимизира деформационното пространство по отношение на запълването му с деформирания материал, степента на деформация и зоните с ИПД, както и осигуряването на натисков сферичен тензор.



Предложена е формула за определяне на ефективността на деформациите при реализиране на V-образна РКЕ, която влючва двете зони показани на фиг. 3.2-9: $\varepsilon_{eff} = 1/\sqrt{3} [2]$

$$2\cot(\Phi/2+\Psi/2)+\Psi.\csc(\Phi/2+\Psi/2)] + 1/\sqrt{3}[2\cot(\Phi/2+\Psi_1/2) +$$

 $+ \Psi_{1}.cosec(\Phi/2 + \Psi_{1}/2)]$

/3.1-3,

където: ε_{eff} са ефективни деформации, $\boldsymbol{\Phi}$ е вътрешния ъгъл между двата пресечени канала, $\boldsymbol{\Psi}$ и Ψ_1 са външни ъгли, определящи се от радиуса на закръгление между пресечените канали с различни стойности за двете зони (фиг 3.2-8).

Заключение: Разпределението на ефективните деформации чрез извършената компютърна симулация е сравнена с аналитично получените стойности. Получено е съвпадение на резултатите, което ни дава основание да твърдим, че схемата на "V-образна" равноканална екструзия е осъществима с предложената нова кинематична схема.

3.2.3. Симулация на процеса двуъглова равноканална екструзия

Разглеждана е двуъглова РКЕ по предложената нова кинематична схема за реализиране на ИПД. Разработен е виртуален 3D инструмент (фиг. 3.2-14), показан и омрежен с помощта на QForm. 3D изглед в дълбочина на инструмента (фиг. 3.2-14 б.), състоящ се от: контейнер (1) и контра-поансон (3), зададени да бъдат статични в програмата; следвайки приетата кинематична схема (фиг.3.1-3), подвижната поансон-матрица (2) е с изрязан в нея канал за реализиране на двуъглова РКЕ, в който се поставя заготовката (4).



С цел оптимизиране на деформационното пространство са направени серия от симулации с различни параметри (фиг. 1.1-1) на деформационното пространство. След направеното симулиране на избраната схема с параметър K = 10.6 мм, ъгъл $\Phi = 135^{\circ}$ и радиуси R = 2.5 и r = 0.1 е установено, че с така предложената нова кинематична схема е възможно реализиране на ИПД чрез двуъглова РКЕ. Установено е запълване на деформационното пространство по време на симулациятя (фиг.3.2-16) и степен на деформация след втората деформационна зона ($\varepsilon_{eff} = 1$) за един преход (в червен цвят).

3.2.4. Симулация на процеса четириъглова равноканална екструзия

Деформационното пространство е разработено с 4 зони на ИПД. Разработен е виртуален инструмент (фиг. 3.2-18 б.), състоящ се от: контейнер (1) и контра-поансон (3), зададени да бъдат статични в програмата QForm; подвижна е само поансон-матрицата (2) с изрязан канал за четириъглова PKE, в който се поставя заготовката (4).



Установените ефективни деформации при компютърното моделиране в различните зони на виртуалната заготовка е показана на фиг. 3.2-20. Ефективните деформации нарастват до $\varepsilon_{eff} = 2.0 - 2.3$ след четвъртата деформационна зона (в червен цвят на фигурата).

Заключение: Разпределението на ефективните деформации чрез извършената компютърна симулация отговаря на теоретичните сведения за процеса РКЕ. Полученото

запълване на деформационното пространство с така подбраните размери на деформационното пространство и ясно изразените зони на ефективните напрежения по време на симулацията, ни дава основание да твърдим, че предложената нова кинематична схема (фиг. 3.1-4) за реализиране на равноканална екструзия е осъществима.

3.3. Проектиране и разработване на нова модулна инструментална екипировка за РКЕ с подвижен поансон-матрица, осигуряваща натисков сферичен тензор в процеса на интенцзифицирана пластична деформация

3.3.1. Проектиране на инструментална екипировка за едноъглова РКЕ.

Проектираният инструмент е представен като монтажен чертеж на фиг. 3.3-1. Проектиран е на модулен принцип, като твърдо тяло с два основни модула:



- модул матрица-контейнер (1); - модул поансон-матрица (2).

3.3.2. Проектиране на инструментална екипировка за "V-образна" екструзия

Проектираният инструмент е представен като монтажен чертеж на фиг. 3.3-2. Проектиран е на модулен принцип, като твърдо тяло с два основни модула:

- модул матрица-контейнер (1); - модул поансон-матрица (2).



3.3.3. Проектиране и разработване на инструментална екипировка за двуъглова РКЕ с подвижна поансон-матрица, осигуряваща натисков сферичен тензор в процеса на интензифицирана пластична деформация

Проектираният инструмент е представен като монтажен чертеж на фиг. 3.3-3. Проектиран на модулен принцип, като твърдо тяло с два основни модула: – модул матрица-контейнер (1); – модулна поансон-матрица (2).



На снимката (фиг. 3.3-5.) са показани изработените поансон-матрици заедно, с прикрепените към тях държачи. Единият поансон-матрица е изработен с възможна минимална стойност за К = 7 мм (фиг.3.3-5), получена от симулацията. Също така е изработен и втори поансон-матрица с оптимизирана геометрия на деформационното пространство и стойност за К = 10.6 мм (фиг 3.3-5).



3.3.4. Проектиране и разработване на инструментална екипировка за четириъглова *РКЕ* с подвижна поансон-матрица, осигуряваща натисков сферичен тензор в процеса на интенцзифицирана пластична деформация

Инструменталната екипировка за реализиране на четириъглова равноканална екструзия е разработена на модулен принцип, използвайки за база напрупания опит от първоначално изработената и работеща успешно инструментална екипировка за реализиране на двуъглова равноканална екструзия.



Преди проектиране на конкретните технологичните параметри на бъдещия инструмент, с цел изясняване на концепцията, позволяваща реализиране на работеща конструкция, бе изработен негов работен макет (фиг. 3.3-9 а) от прозрачен плексиглас.



съставната поансон-матрица(б)

3.3.5 Конструкция на инструментална екипировка за реализиране на четириъглова равно канална екструзия

Конструкцията на инструмента за четириъглова канална екструзия е представена на фиг. 3.3-10. Инструменталната екипировка за реализиране на четириъглова равноканална екструзия е разработена на модулен принцип, използвайки за база напрупания опит от изработената и работеща вече инструментална екипировка за реализиране на двуъглова равноканална екструзия.



Разработената модулна конструкция за реализиране на четириъглова РКЕ с подвижен поансон-матрица (фиг3.3-11а) и неподвижен контра-поансон, е изработена и пусната в експлоатация в лабораторията по пластична деформация, катедра МТМ. Снимка на инструмента в работещ вид, монтиран на изпитателна хидравлична преса в лабораторията, е даден на фиг3.3-116.





3.4. Изводи:

1. Създадените нови кинематични схеми за РКЕ са с възможности за постигане на "големи" ($\varepsilon_{eff} > 4$) степени на деформация, илюстрирано чрез числен експеримент с аналитични зависимости и симулации с QForm на едноъглови и "V-образна" РКЕ.

2. Установено е съответствие между определените, чрез симулация с QForm и чрез използваните аналитични зависимости, степени на деформация за едноъглови и "V" PKE.

3. Симулациите на РКЕ с QForm предоставят възможност за оптимизиране на геометричните параметри на деформационното пространство на дву- и четириъглова РКЕ по новосъздадените кинематични схеми, чрез критерия "запълване на деформационното

2016

пространство", с което се осигурява напрегнато състояние с натисков сферичен тензор, предотвратяващ разрушаването на заготовката.

4. Създадената инструментална екипировка за дву- и четириъглова РКЕ, проектирана и изработена по модулни схеми позволява използването й с различни геометрични параметри на деформационното пространство само чрез смяна на "поансон-матрицата".

5. С оптимизираните чрез симулация с QForm геометрични параметри на деформационнто пространство на двуъглова РКЕ е възможно екструдираната заготовка да запази изходната си форма и размери и да отпадне необходимостта от изравняване на челните й повърхности за следващия преход.

6. Разработена е нова схема за четириъглова РКЕ на база на оптимизираното деформационно пространство при двуъглова РКЕ. Предимствата на новата схема са, че не се налага междинно изваждане на заготовката от поансона матрица между отделните преходи.

Глава 4. Деформационно /деформирано/ състояние при двуъглова и четириъглова равноканална екструзия

От изменението в геометричните размери на всяка една клетка от координатната мрежата могат да се определят ефективните деформации в геометричния център на тази клетка. Ефективните деформации ε_{eff} всъщност дават числен израз на девиатора на деформациите, който може да бъде използван като числен параметър при определяне на неравномерността на деформациите в обема на деформираното тяло.

4.1.2. Експериментална част – провеждане на експеримента

На фиг. 4.1-11 е дадена една елементарна клетка от нанесена върху пробното тяло координатна мрежа, обозначена като A_1 , където с A_2 се означава реда по оста Y, а с цифра (1-n) колоната спрямо X, когато заготовката е разположена успоредно на оста X. Всяка една клетка има по четири ъгъла, които имат съответните координати по оста X и оста Y. Те са означени за всяка клетка с X_1Y_1 , X_2Y_2 , X_3Y_3 , X_4Y_4 , както са нанесени на фиг 4.11, обратно на часовниковата стрелка. Макар на пръв поглед не логично, поглеждайки фиг 4.12 става ясно че след измерване на точките X_4Y_4 сме най-близо до X_1Y_1 на клетката от горното ниво, което улеснява измерването.



4.2. Експериментално получено разпределение на деформационните зони и неравномерността на деформациите при двуъглова равноканална екструзия чрез физическо моделиране със съставен оловен образец, по метода на координатните мрежи

Разпределението и неравномерността на деформациите е определена в четири зони от деформационното пространство на инструмента за двуъглова екструзия с по четири редове от елементарни клетки, всеки от тях с по пет клетки (фиг. 4.2-1) във всеки ред и различен брой редове или части от редове, в зависимост от местоположението им. Отделните специфични зони (фиг. 4.2-1) са, както следва: Зона 1 - Начална недеформирана част на

заготовката (при входния канал непосредствено до контра-поансона) с частично навлизане в деформационна зона на първия кръстосан канал – означена като позиция 1 на фиг. 4.2-1; Зона 2 - Първа ъглова деформационна зона на заготовката при първия кръстосан канал между входния и междинния канали – означена като позиция 2 на фиг. 4.2-1; Зона 3 – Междинна зона (между деформационните зони под ъгъл 135°при кръстосаните канали) на заготовката - означена като позиция 3 на фиг. 4.2-1; Зона 4 - Втора ъглова деформационна зона на заготовката при втория кръстосан канал с навлизане в изходния канал - означена като позиция 4 на фиг. 4.2-1; Зона 5 - двукратно деформирана част от заготовка – –позиция 5.



Сравняване на резултатите от физичното моделиране на неравномерността на деформациите при двуъглова РКЕ и получената чрез компютърно симулиране.

Целта на физическото моделиране е да се определят стойностите и разпределението на ефективните деформации в отделните деформационни зони на екструдираната заготовка.



Образувалите се три зони с различни стойност на ефективните деформации са ясно разграничени една от друга (фиг. 4.2-11). Получените при моделиране с QForm 7.2.4 стойности на ефективните деформации в надлъжно сечение на образеца са, както следва: за междинната зона №3, след еднократно деформиране на заготовката - 0.50 (светло зелен) – 0.70 (зелен цвят); - в изходната зона №5 след двукратно деформиране на заготовката от 1.00 (жълт цвят) – до 1.20 (оранжев цвят). При симулирането се наблюдава неравномерност на

ефективните деформации по напречното сечение в изходната крайна зона, както и в недеформираната крайна част.



Моделирането на разпределение на ефективните деформации с QForm 7.2.4 (фиг. 4.2.-12 и 4.2.-13) потвърждава направените пресмятания за стойностите на ефективните деформации, получени чрез физическо моделиране.

4.2.1. Експериментално получено разпределение на деформационните зони и неравномерността на деформациите при четириъглова РКЕ, чрез физическо моделиране със съставен оловен образец, по метода на координатните мрежи

Разпределението и неравномерността на деформациите е определена в девет участъка от деформационното пространство на инструмента за четириъглова екструзия, всеки от тях с по пет клетки (фиг. 4.2-14.) във всеки ред и различен брой редове или части от редове в зависимост от местоположението им.



Деформационните зони (фиг. 4.2-14) са, както следва: Зони 1 - Начална недеформирана част на заготовката (при входния канал непосредствено до контра-поансона) с частично навлизане в деформационна зона 2 на първия пресечен канал. Клетките са недеформирани. Зони 2 - Първа ъглова деформационна зона на заготовката между входния канал 1 и ъгловата зона 3. Клетките в близост до външният ъгъл (за заготовката от горната й страна на фиг. 3) са най-силно деформирани. Зони 3 - Междинен канал между деформационните зони 2 и 4 на пресечените е канали между входния канал 1 и междинния канал 5. Клетките са преминали от квадрат в ромбоидни успоредници, което е валидно за цялата зона. Зони 4 - Втора ъглова деформационна зона на заготовката от кръстосания канал 3 и до навлизане в зоната на междинния успореден канал 5. Клетките в близост до вътрешният ъгъл са най-силно деформирани, но при този ъгъл най-деформирани се оказват клетките от външната страна на заготовката. Зони 5 - Междинен успореден канал. Клетките от мрежата са възвърнали (в известна степен) първоначалната си квадратна форма. Зони 6 - Трета ъгловата деформационна зона на заготовката между междинния успореден канал 5 и втория кръстосан канал 7. Аналогично на втора ъглова зона 4 клетките в близост до вътрешният ъгъл са найсилно деформирани, но при този ъгъл най-деформирани се оказват клетките от външната страна на заготовката. Зони 7 - Междинен кръстосан канал между деформационните зони 6 и 8 на кръстосаните ъгли между междинния успореден на входния канал 5 и изходния канал 9. Клетките са преминали отново от квадрат в ромбоидни успоредници, което е валидно за цялата зона. Зони 8 - Четвърта ъглова деформационна зона на заготовката при втория кръстосан канал 7 и изходния канал 9. Аналогично на първа ъглова зона клетките в близост до външният ъгъл за заготовката са най-силно деформирани. Зони 9 - Изходен краен канал. Клетките от мрежата в изходния канал са придобили отново първоначалната си квадратна форма. С изключение на последните три реда, тъй като заготовката в тази начална на процеса фаза при навлизането й в деформационното пространство частично е деформирана.

Сравняване на резултатите от физичносто моделиране на неравномерността на деформациите при четириъглова равноканална екструзия и получената такава чрез компютърно симулиране

Целта на физическото моделиране е да се определят стойностите и разпределението на ефективните деформации в отделните деформационни зони на екструдираната заготовка. Определените ефективни деформации в клетките по метода на координатните мрежи след еднократно екструдиране са 0.54 – 0.59, като клетките от мрежата се изправят и достигат първоначалните си размери в междинния канал, след което отново се деформират до 0.53 – 0.57 и преминавайки в изходния канал - отново се изправят до първоначалните си размери. Установените средни стойности на ефективните деформации след четирикратното деформиране достигат до 2.15 до 2.30.



Използваната версия на програмния продукт има възможност за въвеждане на координатна мрежа. Моделираното изменение на въведената в QForm мрежа (Фиг. 4.2-30) съответства на начина на деформиране в реалния оловен образец. Минимална разлика е видима в изходния канал, където след двукратното екструдиране на заготовката не се получава пълно изправяне на клетките от мрежата (Фиг. 4.2-31).

Образувалите се пет зони с различни стойност на ефективните деформации са ясно разграничени една от друга (фиг. Фиг 4.2-32). Използването на метода на координатните

мрежи, без допълнителна математическа обработка на пресметнатите резултати, не е достатъчно за определяне на ефективните деформации при четириъглова РКЕ.



Това налага допълнителна математическа обработка на пресметнатите стойност на ефективните деформации, след която методът на координатните мрежи може да бъде използван за верифициране неравномерността на деформациите при работа в програмен продукт за симулиране на четириъглова РКЕ. Верифицирането разпределението на степените на деформация чрез физическо моделиране може да бъде използвано при коригиране на въведената входна информация, касаеща граничните условия на деформиране.

4.3. Анализ и математическо обработване на резултатите на равноканална двуъглова/четириъглова екструзия.

Действителните деформации настъпили в оловен образец с нанесена координатна мрежа, измерени с помощта инструментален микроскоп след деформиране, са начертани с помоща на програмен продукт MATLAB и са показани на: фиг. 4.3-1а за образец деформиран чрез двуъглова РКЕ и фиг. 4.3-1б за четириъглова РКЕ.



В следващите подточки, с цел допълнително изглаждане на ефективните деформации, са използвани интерполация и апроксимация на пресметнатите ефективни деформации. Апроксимираните ефективни деформации са направени с полиними и по метода Subdivision.

4.3.1. Дискретно деформационно състояние. Графично изобразяване на деформационното състояние при двуъглова и четириъглова РКЕ.

Пресметнатите ефективни деформации са без въвеждане на междинна виртуална клетка и без натрупване на деформация. Нека $(x_1^i, y_1^i), \dots, (x_4^i, y_4^i)$ са координатите на четирите ъгъла на *i* – тата клетка, тогава $r_{13}^i = \sqrt{(x_1^i - x_3^i)^2 + (y_1^i - y_3^i)^2}$ и $r_{24}^i = \sqrt{(x_2^i - x_4^i)^2 + (y_2^i - y_4^i)^2}$ са диагоналите на тази клетка.

Изчислената по метода на координатните мрежи ефективните деформации за всяко клетка е приведена към пресечната точка на съответните й диагонали, спрямо идеална не деформирана клетка с диагонали 2.5 х 2.5 мм. Резултатите от пресметнатите логаритмичните деформации са показани на фиг.4.3-3.



Видно от графиката е че ефективните деформациите тръват от идеална клетка (в т.син цвят), минават през пик, които е след преминаване на първата деформационна зона (в оранжев цвят) и преминаваики след втората деформационна зона се връщат в изходна позиция (в т.син цвят). Графиката е с изразена нееднородност, което наложи използването на апроксимация с цел изглаждане на графиката и въвеждане на алгоритъм за натрупване на деформациите след всяка деформационна зона





Получените резултати апроксимирани с полином от 6-та степен без натрупване на деформациите са показани на фигура 4.3-5. Двуъглова РКЕ апроксимирани с полином от 4-та степен с натрупване на деформациите, с въвеждане на междинна виртуална клетка (фиг. 4.3-7) видно от графиката е, че степента на деформаците се увеличава след преминаване на деформационните пространства като достига пик след втора деформационна зона на деформационното просттранство при двуъглова РКЕ.



Четириъглова РКЕ апроксимирани с полином от 4-та степен без натрупване на деформациите, без въвеждане на междинна виртуална клетка е дадена на (фиг.4.3-6). Видно от графиката е, че тя е вече изгладена за разлика от (фиг.4.3-4). На следващата фигура.4.3-8. са показанрезултатите от четриъглова ИПД апроксимирани с полином от 4-та степен с натрупване на деформациите, и с въвеждане на междинна виртуална клетка.

4.3.3. Дискретно деформационно състояние. Графично изобразяване на деформационното състояние с въвеждане на виртуална междинна клетка.

За детаилизиране на разликите в ефективните деформации между две съседни клетки беше въведена дискретна междинна виртуална клетка, с върхове разположени в средите на страните на двете съседни реално измерени клетки (фиг.4.3-9).



Изчислената по метода на координатните мрежи интензивност на деформациите за всяко клетка е приведена към пресечната точка на съответните й диагонали. Резултите от пресметнатите логаритмичните деформации са показани на (фиг.4.3-10).



Резултатите от пресметнатите логаритмичните деформации, показани на (фиг.4.3-11), са получени от снетите данни при физично моделиране по метода на координатните мрежи при четириъглова РКЕ. Получените стойности за ефективните деформациите са - ε_{eff} =1.7 – 2.4.

4.3.4. Графична интерпретация на деформационо състояние, чрез апроксимиране на експериментално получените ефективни деформации по метода subdivision.

Като се използват двумерни Subdivision схеми с гаусови коефициенти е апроксимирана графиката на логаритмичните деформации изчислени по метода на координатните мрежи. Деформацията на всяка клетка е приведена към пресечната точка на съответните й диагонали. Резултата от пресметнатите ефективни деформации са показани на фиг. 4.3-12.

Апроксимация на ефективни деформации на двуъглова ИПД фиг 4.3-12 по метода Subdivision с добавена междина клетка дава добро заглаждане на графиката, с изключение на червената зона, пикът в тази зона се дължи на неточност при снемане на резултатите. На следващата графика фиг. 4.3-13 са показани резултатите, получени по метода Subdivision с добавена междинна клетка и с натрупване на ефективните деформации за всяка следваща клетка. Получените стойности за ефективните на деформации са - $\varepsilon_{eff} = 0.75$.



Апроксимация на ефективни деформации на четириъглова ИПД фиг 4.3-14 по метода Subdivision в този случай не дава добри резултати (заглаждане) видно от графиката, за разлика от всички останали случай в кото, тои дава добро заглаждане. На следващата

графика фиг. 4.3-15 са показани резултатите, получени по метода Subdivision с добавена междинна клетка и с натрупване на ефективните деформации за всяка следваща клетка.



4.4. Изводи

1. Разликата при физическо моделиране, потвърдено от програмния продукт QForm, между двуъгловата и четириъгловата равноканална екструзия се състои в, както следва: - крайната част на недостатъчно деформираната зона при четириъгловата РКЕ е по-голяма, но съизмерима с тази при двуъгловата РКЕ; - средните стойност на сумарните (акумулираните) ефективни деформации при двуъгловата екструзия са $\varepsilon_{eff} = 1.10 - 1.15$, а при четириъгловата РКЕ са два пъти по-големи $\varepsilon_{eff} = 2.15$ -2.30; - неравномерността на деформациите при двуъгловата екструзия с по-висока.

2. От математическо обработване на резултатите се вижда, че след пресмятане на ефективните деформации с собствен код, написан на МАТLAB и с помощта на програмния продукт QForm са получени много близки стойности. Това показва, че получените резултати за ефективните деформации са потвърдени (верифицирани) и на тяхната база може да се извърши последваща апроксимация.

3. На базата на пресметнатите ефективни деформации с помощта на собствен код, написан на MATLAB, е направена апроксимация. За целта са използвани два метода: класическа апроксимация с полиноми по метода на най-малките квадрати и с помощта на метода Subdivision. След анализиране се вижда, че и при двете апроксимации се получава "заглаждане" на неравностите на ефективната деформация, получена от грешките при измерване.

4. След сравняване на двете апроксимации обаче, се оказва че метода Subdivision запазва и локалните свойства на данните за ефективната деформация, докато апроксимацията с полиноми не запазва локалните свойства, т.е. дава само "тенденцията" на изменение на данните.

Глава 5. Регресионни зависимости за изменение на механичните показатели във функция от ефективната степен на деформация при двуканална РКЕ за силно и слабо уякчаващи се среди (технически чист алуминий и оловна сплав)

5.1.3. Резултати от механичното изпитване на образци от избраната за физическо моделиране на двуъглова РКЕ оловна сплав

Установените изменения в механичните характеристики на оловна сплав II - α-твърд разтвор на олово с антимон), деформиран чрез равноканална двуъглова екструзия, определени чрез изпитване на едномерен опън са дадени на фиг. 5.1-8 и 5.1-9.



При изменението на механичните деформационни параметри (относително удължение при максимална сила на опън A_g и относително общо удължение след разрушаване A_t) в зависимост от степента на ефективните деформация има ясно изразен максимум при $\varepsilon_{eff} = 2.2$, следващо намаляване и запазване около така полученото ниво (фиг. 5.1-8).



При якостта на опън (фиг. 5.1-9) се наблюдава аналогично повишаване с увеличаването на степента на деформация, следвано от спад и задържане до едно постоянно ниво, вероятно поради протичане на рекристализационни процеси при високи степени на деформация. Подобна е тенденцията, свързана с изменението на границата на провлачане, повишаването (около 50%) е до степен на деформация (ефективни деформации) от около $\varepsilon_{eff} = 3-4$, следвано от следващо запазване на получените стойности.

В случая на едномерен опън интензивността на деформациите (ефективните деформации) ε_{eff} съвпада с логаритмичната деформация на удължаване ε_{tr} . При това условие уравнението, даващо регресионната зависимост, между границата на провлачане (σ_Y , MPa) и степента на деформация ε_{eff} (ефективни деформации при двуъглова РКЕ на сплав II - α -твърд разтвор на олово с антимон), като апроксимиращ полином от четвърта степен при R² = 0.9826 (фиг. 5.1-9), е както следва:

 $\sigma_Y (\text{MPa}) = -0.0086 \cdot \varepsilon_{eff}^4 + 0.1898 \cdot \varepsilon_{eff}^3 - 1.432 \cdot \varepsilon_{eff}^2 + 4.1348 \cdot \varepsilon_{eff} + 8.2572$ /5.1/.

5.2.1. Изменение на микро/нано твърдостта при деформиране чрез РКЕ на образци от технически чист алуминий

Деформираният технически чист алуминий увеличава неколкократно твърдостта си след деформиране, реализирано чрез двуъглова екструзия, като деформационното уякчаване на метала зависи от степента на деформация, респ. броя на реализираните преходи на двуъглова екструзия.

25

Увеличението на микротвърдостта след втори преход е най-голямо (почти два пъти от тази на летия метал), след което увеличаването на степента на деформация започва да не влияе върху изменението му. Микротвърдостта на деформирания метал леко се понижава и се запазва почти постоянна, като след трети преход престава да зависи от броя на преходите. При резултатите от изпитването чрез наноиндентация се наблюдава аналогично поведение в изменението на твърдостта.

5.2.2. Резултати от механичното изпитване на деформираните образци от технически чист алуминий

На фигурата (фиг. 5.2-1) са дадени диаграмите на натиск (аксиално сплескване) на изпитваните образци от технически чист алуминий, които демонстрират повишаване на якостта на натиск (натоварване, съответстващо на 50% от общото остатъчно скъсяване) и увеличаване на условната граница на провлачане (натиск). След 8 прехода на двуъглова екструзия якостта на натиск и условната граница на провлачане (натиск) са повишени.



На фигура (фиг. 5.2-2) са дадени диаграмите на едномерен опън на изпитваните образци от технически чист алуминий, които демонстрират рязко повишаване на якостта на опън.



Установените промени в механичните характеристики на технически чист алуминий, деформиран чрез равноканална двуъглова екструзия, установени чрез измерване на едномерен опън са дадени на двете графики (фиг. 5.2-3 и фиг. 5.2-4). Докато при деформационните параметри (относително удължение при максимална сила на опън A_g и относително общо удължение след разрушаване A_t) има рязък спад и следващо леко възстановяване (фиг. 5.2-3), то при механичните силови параметри (фиг. 5.2-3) тенденциите са съвсем различни.



Уравнението, даващо регресионната зависимост, между текущата границата на провлачане (σ_Y , MPa) и степента на деформация ε_{eff} (ефективни деформации при двуъглова РКЕ на технически чист алуминий), като апроксимиращ полином от четвърта степен при коефициент на корелация $R^2 = 0.9608$ (фиг. 5.2-4), е както следва:

 $\sigma_Y (\text{MPa}) = 0.0234.\varepsilon_{eff}^4 - 0.2136.\varepsilon_{eff}^3 - 1.4885.\varepsilon_{eff}^2 + 17.237.\varepsilon_{eff} + 22.477 \qquad /5.2/.$

5.3.1. Използване на невронни мрежи за моделиране на измененията на механичните характеристики при деформиране чрез РКЕ на оловна сплав

На фиг. 5.3-2 е представено апроксимираното чрез невронна мрежа изменението на нанотвърдостта на оловната сплав в зависимост от степентта на деформация (големина на ефективните деформации) при двуъглова РКЕ. Апроксимацията е осъществена чрез създадена в МАТLAB права двуслойна невронна мрежа с "tarsing" активиращи функции с първия слой. На базата на тези данни се прави апроксимиране на зависимостта нанотвърдост (MPa) в зависимост от степентта на деформация (ϵ_{eff}) с помощта на невронни мрежи. За целта в МАTLAB се създава права двуслойна невронна мрежа с 4 неврона със 'tansig' активиращи функции в първи слой. Графиката е изобразена на Фиг. 5.3-2.

Вижда се, че невронната мрежа дава апроксимация на регресионната зависимост, поради което те може да бъдат използвани и за построяване на съответните криви за връзка между ефективните на деформациите и микротвърдостта.

На фиг. 5.3-2 и 5.3-3 със звездички са нанесени измерените данни, а с непрекъсната линия е нанесена кривата на апроксимация получена с невронна мрежа.



2016

5.3.2. Използване на невронни мрежи за моделиране на измененията на механичните характеристики при деформиране чрез РКЕ на технически чист алуминий

Получаване на зависимост, даваща връзка между деформационното уякчаване при РКЕ и степента на деформация след изпитване на микротвърдост. Резултатите от тези изпитвания са дадени в таблиците за микротвърдост от точка 5.2. На базата на тези данни се прави апроксимиране на зависимостта нанотвърдост (Hv, MPa) в зависимост от степента на деформация ε_{eff} (ефективни деформации) с помощта на невронни мрежи. За целта в MATLAB се създава права двуслойна невронна мрежа с 4 неврона със 'tansig' активиращи функции в първи слой.



На фиг.5.3-4 и 5.3-5 със звездички са нанесени измерените данни, а с непрекъсната линия е нанесена кривата на апроксимация получена с невронна мрежа.

5.4. Извеждане на регресионна зависимост за апроксимиране изменението на силовите механични параметри за слабо уякчаваща се среда (оловна сплав с антимон), деформирана чрез двуъглова РКЕ

Апроксимиращият полином /5.4-2/ е от четвърта степен при коефициент на корелация $R^2 = 0.9673$ (фиг. 5.4-1 ляво), както следва:

$$\sigma_Y (\text{MPa}) = -0.0079 \cdot \varepsilon_{eff}^4 + 0.1734 \cdot \varepsilon_{eff}^3 - 1.3282 \cdot \varepsilon_{eff}^2 + 3.9757 \cdot \varepsilon_{eff} + 8.1716$$
 /5.4-2/.



Той потвърждава твърдението, че поради "аномалното" поведение на деформирания материал, между текущата граница на провлачане и твърдостта има определена зависимост, която е почти права линия, (фиг. 5.4-1 а). Уравнението /5.4-2/ дава връзката напрежения – деформации ($\sigma_{tr} - \varepsilon_{tr}$) в много широк диапазон от ефективни деформации ε_{eff} (до 9) и всъщност представлява регресионна зависимост за апроксимиране поведението на слабо уякчаваща се среда (оловна сплав с антимон).



Графичната интерпретация на получената регресионна зависимост между текущата граница на провлачане (едномерен опън) и ефективните деформации (двуъглова РКЕ) при оловна сплав е дадена на фиг. 5.4-2.

5.4.1. Извеждане на регресионна зависимост за апроксимиране изменението на силовите механични параметри за силно уякчаваща се среда (технически чист алуминий), деформирани чрез двуъглова РКЕ

Уравнението, даващо регресионната зависимост между нанотвърдост H_{IT} (Беркович) и степен на деформация ε_{eff} (ефективни деформации) до 9.0, като апроксимиращ полином от четвърта степен, може да бъде описано чрез израза (фиг. 5.4-3 б):



$$H_{IT} (\text{GPa}) = -0.0009 \cdot \varepsilon_{eff}^{4} + 0.0118 \cdot \varepsilon_{eff}^{3} - 0.0754 \cdot \varepsilon_{eff}^{2} + 0.2226 \cdot \varepsilon_{eff} + 0.3313 \quad /5.4-3/.$$

Апроксимиращият полином е от четвърта степен при коефициент на корелация $R^2 = 0.9964$ е (фиг. 5.4-3 ляво), както следва:

$$\sigma_Y (\text{MPa}) = -0.0234 \cdot \varepsilon_{eff}^4 + 0.6648 \cdot \varepsilon_{eff}^3 - 6.6812 \cdot \varepsilon_{eff}^2 + 26.609 \cdot \varepsilon_{eff} + 23.082 \quad (5.4-4)$$

Той потвърждава твърдението, че поради "аномалното" поведение на деформирания материал, между текущата граница на провлачане и твърдостта има определена зависимост. Уравнението /5.4-4/ дава връзката напрежения – деформации ($\sigma_{tr} - \varepsilon_{tr}$) в много широк диапазон от ефективни деформации ε_{eff} (до 9) и всъщност представлява регресионна зависимост за апроксимиране поведението на силно уякчаваща се среда (технически чист алуминий), деформирана чрез РКЕ.

2016



Графичната интерпретация на получената регресионна зависимост между текущата граница на провлачане (едномерен опън) и ефективните деформации (двуъглова РКЕ) при технически чист алуминий е дадена на фиг. 5.4-4.

5.5. Изводи

1. Потвърдено е, че при деформирането чрез РКЕ съществува връзка между изменението на текущата граница на провлачане σ_Y (получена чрез изпитване на едномерен опън) и на определените чрез изпитване на микро/нанотвърдост параметри (HV/H_{IT}) за оловни сплави и алуминиеви пробни тела.

2. Регистрирано е, че при деформиране на слабо/силно уякчаващи се среди чрез двуъглова РКЕ при високи степени на деформация ($\varepsilon_{eff} \ge 4$) и натисков сферичен тензор, повишаването на силовите механични параметри (границата на провлачане σ_Y и микро/нано твърдостта HV/H_{IT}) е само до определена степен на ефективните деформации ε_{eff} , след което следва "аномално" понижаване и задържане на определено ниво.

3. Регистрирано е, че при деформиране на силно уякчаващи се среди (технически чист алуминий) чрез двуъглова РКЕ при високи степени на деформация ($\varepsilon_{eff} \ge 4$) и натисков сферичен тензор, намаляването на пластичността е само до определена степен на ефективните деформации ε_{eff} , след което следва "аномално" повишаване и задържане на определено ниво.

4. Изменението на границата на провлачане σ_Y и микро/нано твърдостта HV/H_{IT} в зависимост от степента на ефективните деформация ε_{eff} е апроксимирано с метода на невронните мрежи, като е потвърдено "аномалното" поведение на тези механични параметри за силно и слабо уякчаващи се среди, деформирани чрез двуъглова РКЕ при високи степени на ефективните деформации ($\varepsilon_{eff} \ge 4$).

5. Предложена е методика и са изведени регресионни зависимости за апроксимиране изменението на текущата граница на провлачане σ_Y във функция от ефективните деформации на оловни и алуминиеви пробни тела, деформирани чрез двуъглова РКЕ чрез последователни итерации (Excel) на дискретно получени чрез едномерен опън стойности на текущата граница на провлачане σ_Y .

6. Изведените регресионни зависимости за апроксимиране изменението на силовите и деформационни механични характеристики във функция от ефективните деформации на оловни и алуминиеви пробни тела, деформирани чрез двуъглова РКЕ, отчитат "аномалното" поведение на границата на провлачане σ_Y при големи степени на деформация $\varepsilon_{eff} \ge 4$.

ПРИНОСИ

1. Предложени са нови кинематични схеми на инструментална екипировка за интензивна пластична деформация (ИПД), осъществени чрез "ъглова" равноканална екструзия (РКЕ). Новост, е че с тях РКЕ се осъществява чрез подвижно спрямо, неподвижната заготовка ъглово деформационно пространство, с което решение се намаляват силите на контактно триене. Намалява се натоварването на инструменталната екипировка, лимитиращо допустимите степени на деформация в един преход на РКЕ.

2. Придобити са, чрез числен експеримент с програмен продукт QForm и аналитична зависимост, данни за ефективната деформация при ъглова (РКЕ), осъществена по новите кинематични схеми на инструменталната екипировка. Данните демонстрират възможностите на предложените кинематични схеми за постигане на "големи" ефективни деформации ($\epsilon_{eff} \ge 4$).

3. Оптимизирани са, чрез числени симулации с QForm, геометричните параметри на деформационното пространство на инструмент за дву- и четириъглова РКЕ, по критерия "запълване на деформационното пространство" с материала на заготовката. Удовлетворяването на този критерии означава непрекъснат контакт на заготовката с повърхността на деформационното пространство, създаващ напрегнато състояние в заготовката с натисков сферичен тензор, което предотвратява появата на пукнатини в нея и позволяващо постигането на "големи" ($\varepsilon_{eff} \ge 4$) ефективни деформации.

4. Създадена е и успешно е експериментирана инструментална екипировка за дву- и четириъглова РКЕ, проектирана и изработена по новопредложените кинематични схеми и на модулен принцип, позволяващ използването и за различни параметри на деформационното пространство, чрез замяна само на модула "поансон-матрица".

5. Предложен е и експериментиран усъвършенстван вариант на метода на координатните мрежи, чрез въвеждането на "виртуална клетка" с върхове, средите на две съседни реални клетки, с което се постига по-голяма гъстота (намалена дискретност) на точките, в които се измерват деформациите. Установено, е че използването на "виртуална клетка" предоставя по-подробна и по-точна информация за деформационното състояние при дву- и четириъглова РКЕ.

6. Придобити са, чрез метода на координатните мрежи, експериментални данни за дискретното деформационно състояние при дву- и четириъглова РКЕ, доказващи възможността на използваните деформационни схеми за ИПД и постигане на "големи" (*ε*_{eff}≥ 4) ефективни деформации.

7. Направени са, чрез метода на най-малките квадрати и чрез Subdivision, полиномни апроксимации на експериментални данни за ефективните деформации, предоставящи информация за непрекъснатия характер на деформационното състояние при дву- и четириъглова РКЕ.

8. Придобити са експериментални данни за влиянието на степента на деформация при двуъглова РКЕ, представена като брой преходи, върху механичните характеристики (Re, Rm, Ag, At, HV) на пробни тела от оловна сплав и технически чист алуминий.

9. Изведени са, чрез програмен продукт Excel регресионни модели за влиянието на ефективните деформации. при двуъглова РКЕ върху границата на провлачане и твърдостта (микро и нано твърдост), на пробни тела от оловна сплав и технически чист алуминий.

10. Регистрирано е "аномално" намаляване на границата на провлачане и на твърдостта с увеличаване на степента на студена пластична деформация при двуъглова РКЕ,

на пробни тела от оловна сплав и технически чист алуминий, наблюдавано при големи ($\epsilon_{eff} \ge 4$) ефективни деформации.

11. Предложена е методика и са изведени регресионни зависимости за апроксимиране на "аномалното" за изменение на границата на провлачане и твърдостта във функция от ефективните деформации на оловни и алуминиеви пробни тела, екструдирани чрез двуъглова РКЕ.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. В. Камбуров, А. Сергисова, М. Дачева, А. Николов, Определяне твърдостта на чист алуминий, подложен на интензивна пластична деформация, чрез методите на нано- и микроидентация, сп. "Машиностроене и машинознание,, т. 19, кн. 2, 2013.

2. А. Николов, А. Димитрова, Технология за изработване на заготовки за реализиране на двуъглова и четириъглова равноканална екструзия от нискотопими метали и сплави, Конференция с международно участие "Металолеене 2014" Плевен, април 2014.

3. V. Kamburov, **A. Nikolov**, N. Radeva, 3D simulation of extrusion process together with torsion using CAD/CAE product, 9th International Seminar Advance Manufacturing Technologies, Sozopol, 25-30, June 2015.

4. А. Николов, Деформационно състояние при интензифициране на пластична деформация чрез четириъглова равноканална екструзия, "Международна научна конференция "70 години МТФ", 11-13 Септември, 2015, Созопол, България.

Авторът благодари на Договор № ДУНК-01/3 "Създаване на Университетски научноизследователски комплекс (УНИК) за иновации и трансфер на знания в областта на микро/нано технологии и материали, енергийната ефективност и виртуалното инженерство" за оказаната финансова подкрепа, както и на колегите, оказали съдействие при извършване на компютърната симулация със специализирания програмен продукт Quantor Form 2D/3D.

CONSTRUCTION SCHEMES FOR SEVERE PLASTIC DEFORMATION OF METALS BY EQUAL CHANNEL ANGULAR EXTRUSION

Antonio Nikolov

Anotation

The processes of Severe Plastic Deformation and achieved by ultrafine micro/nano structures are the subject of intense research in the academic community in recent years. New kinematic schemes for realizing of equal channel angular extrusion have been developed and described by using software QForm: single angle, V-shaped, double angle and new scheme for four angle extrusion. The possibility of practical use of some of the obtained results was investigated by developing of instrument for realizing single and double angle extrusion, with the aid of which is carried out physical modeling of equal angular extrusion. Based on identified through testing deformation parameters at high and low work hardening materials (technically pure aluminum and lead alloy) have been brought out regressions for approximate of "anomalous" amendment of yield strength and hardness as a function of effective strain.