РУСЕНСКИ УНИВЕРСИТЕТ „АНГЕЛ КЪНЧЕВ”

Факултет: „ Машинно технологичен”
Катедра: „Материалознание и технология на материалите”

маг. инж. Емил Христов Янков

Изпитване на листови материали при двумерен опън чрез хидравлично издуване

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за присъждане на образователната и научна степен

„Доктор”

Русе, 2014г.

РУСЕНСКИ УНИВЕРСИТЕТ „АНГЕЛ КЪНЧЕВ”
Факултет „ Машинно технологичен ”
Катедра: „Материалознание и технология на материалите“

маг. инж. Емил Христов Янков

ИЗПИТВАНЕ НА ЛИСТОВИ МАТЕРИАЛИ ПРИ ДВУМЕРЕН ОПЪН ЧРЕЗ ХИДРАВЛИЧНО ИЗДУВАНЕ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за присъждане на образователната и научна степен
„Доктор”

по научната специалност / докторска програма:
„Технология, машини и системи за обработка чрез пластично деформиране”

Научен ръководител: доц. д-р инж. Валентин Гагов

Рецензенти:
1. проф. д т н инж. Йордан Генов Генов
2. доц. д-р инж. Иван Димитров Дерменджиев

Русе, 2014г.

Докторантът работи като асистент по дисциплините „Обработване на металите чрез пластична деформация, „Технология на материалите”, „Технология на материалите IIА”, „Технология на материалите IIБ”, „Инструменти за леене на метали и пластмаси” и „Учебна практика технологична” към катедра „.Материалознание и технология на материалите ” на факултет „Машинно технологичен” при Русенския университет „Ангел Кънчев”. Бил е докторант в същата катедра. В тази катедра са извършени и изследванията по дисертацията.

Дисертационният труд е обсъден и насрочен за защита от научно звено, включващо преподаватели от катедра „Материалознание и технология на материалите ” при Русенския университет „Ангел Кънчев”, състояло се на 05.12.2014г.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на открито заседание пред научно жури, назначено от ректора на Русенския университет, на 29.04.2015г. от 13:00 часа в зала 105, корпус 3 на университета. Материалите на докторанта са на разположение на заинтересованите в катедра „Материалознание и технология на материалите”. Авторефератът е публикуван в сайта за развитие на академичния състав на университета.

Автор: маг. инж. Емил Христов Янков
Заглавие: „Изпитване на листови материали при двумерен опън чрез хидравлично издуване”

Тираж: 20бр.
Издателски център на Русенския университет „Ангел Кънчев”

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Развитието на съвременните технологии в областта на пластичното деформиране на металните листови материали налага необходимостта от по-пълното изследване на механичните им свойства в условията на високите степени на деформация над *30%*. Един от методите, който напоследък има все по-нарастващо значение и приложение в световен мащаб е методът на изпитване на двумерен опън чрез хидравлично издуване (ХИ). Методът още не е стандартизиран в машиностроенето. Той се използва освен за изследване на метални листови материали от конвенционални и нови сплави, но и за други материали, като свръхпластични метали, фолиа, различни по природа покрития, елементи на електронната промишленост, хартия, кожи и др. До настоящия момент у нас няма база и екипировка за провеждане на изпитвания по този метод или други методи, основани на прилагането на двумерен опън. Без наличието на тези условия ефективното прилагане на моделиране, оптимизиране и контролиране на процесите на обработка, особено на новосъздадени листови материали от високоякостни сплави остава проблематично. Създаването на компютъризирана система за изпитване и изследване по метода ХИ е от първостепенно значение за поставяне началото на по-задълбочено изучаване у нас на пластичното поведение на листови материали.

Следва да се отбележи, че с такава система се доокомплектова съвременната база на Университета за комплексно изследване съвместно с доставената модерна компютъризирана машина INSTRON на механичните свойства на валцовани продукти от нови сплави, получени чрез топене във вакуум или в неутрална атмосфера в университетската лаборатория за специални сплави.

Цел и задачи на работата

Целта на дисертацията е да се приложи методът на хидравлично издуване за изпитване на индустриални листови метали чрез създаване, тестване и използване на собствени методики, компютъризирани модули и програмни продукти. За реализиране на поставената цел са формулирани следните задачи:

1. Предвид липсата на стандарт за изпитване чрез хидравлично издуване да се направи предварителен теоретичен анализ на процеса и неговите основни параметри, от които зависи точността, надеждността и възпроизводимостта на получаваните резултати.
2. Да се разработи инструмент и екипировка за хидравлично издуване на листови метали, която да позволява провеждане на изследвания върху проби с различни диаметри и дебелини.
3. Да се разработят компютъризиран модул за листово деформиране чрез хидравлично издуване и софтуерен продукт за мониторинг на деформационния процес и за обработване и записване на опитните данни в реално време.
4. Да се разработят методика, компютъризиран модул и софтуерен продукт за автоматизиран тримерен анализ на формата и размерите на деформирани пробни тела.

5. Да се проведат лабораторни изпитвания с помощта на разработените инструменти, модули и софтуерни продукти, като се използват проби от избрани широко използвани марки метални листи и се анализират данните с оглед на функционалните възможности на експерименталните средства за получаване на надеждни, възпроизведими и с достатъчна точност резултати.
6. Да се построят експериментални криви на деформационно уякчаване за избраните марки метални листи чрез изпитване на хидравлично издуване в кръгли матрици на проби с различни диаметри при степенно и непрекъснато деформиране.

Метод на изследване

Конвенционалният метод на изпитване чрез ХИ служи за определяне на истинското напрежение и деформация в една точка-полюса на деформирания образец на позицията на деформиране. В настоящата дисертация е приложен друг подход с оглед осигуряване възможност и за провеждане на научни изследвания, обхващащи по-широк кръг от проблеми. За тази цел е разработен нов метод за изследване на листови материали, характеризиращ се с компютърен анализ на 3D-образа на деформирания образец. На базата на разработения метод е създадена оригинална двумодулна система за изследване. Деформирането се осъществява на една позиция в първия модул, а лазерното сканиране и анализът на 3D-образа - на друга позиция във втория модул.

От проведените изследвания със създадената компютъризирана система са получени резултати, които доказват нейната функционалност и възможност за по-пълно изследване пластичното поведение на метални листови материали.

Научна новост

Разработен е нов метод за изследване на напрегнатото и деформирано състояние на хидравлично издути образци от листови материали, характеризиращ се с компютърен анализ на лазерно сканирания им образ.

Предложеният метод създава условия за генериране на допълнителна база данни при изследване пластичното поведение на разнообразни материали – метални и неметални, което може да допринесе за по-нататъшното развитие на теорията на пластичността, тъй като за разлика от прилаганите понастоящем методи, при които се определя деформацията и напрежението само в една точка - полюса на образеца, той дава възможност за определяне на напрегнатото и деформирано състояние във всяка негова точка при зададена степен на деформация, както и установяване закона на нейното движение.

С прилагане на цифрова обработка на повърхността на 3D-образа се елиминират неизбежните погрешности на оптическите системи, които понастоящем имат приоритетно приложение за следене деформациите на позицията на издуване и се осигурява възможност да се реши дискусионният въпрос за геометричната форма на деформирания образец – съществено условие за прецизиране на крайния резултат от ХИ-теста - зависимостта еквивалентно напрежение- еквивалентна деформация. Установено е, че за изследваните метали 08кп, X5Cr-Ni18-10 и *Al99.5* по-голямата част от образеца, без зоните в близост

до периферията, има сферична повърхност, площта на която зависи от степента на деформация.

Установени са законите на изменение на анизотропните коефициенти на листови материали на две широко използвани марки стомани *08кп, X5Cr-Ni18-10* и *Al99,5* при пластично деформиране. С увеличаване на степента на деформация до достигане началото на нестабилност, частните коефициенти на анизотропия нарастват постепенно и като резултат средните коефициенти на нормална и равнинна анизотропия се повишават непрекъснато.

Доказано е, че коректният подход за получаване на обобщената зависимост еквивалентно напрежение-еквивалентна деформация е чрез коригиране на данните, получени при предпоставката за изотропност, с коефициентите на анизотропия на изследвания материал, като се отчита функционалната им зависимост от степента на деформация. Прилагането на този подход ще съдейства за отпадане практиката на търсене емпирични корекционни коефициенти или използване на мащабиране на данните с оглед избягване разминаването във взаимното разположение на кривите напрежение-деформация, получени от едномерния и двумерния опън.

Приложимост и полезност

Построени са експериментални криви на деформационно уякчаване при едномерен и двумерен опън за изпитваните метали по създадената собствена методика, които могат да се използват за технологично проектиране или при компютърно симулиране на листови деформационни процеси. Възможността за генериране на разширена база данни при използване на разработения подход ще спомогне за по-ефективно симулиране и за намиране на оптимални технологични решения.

Създадените методики, уредби и софтуерни продукти могат да бъдат използвани за изпитване на различни други листови материали, за обучение на студенти в бакалавърска и магистърска степен и за научно обслужване на заинтересовани производствени фирми, особено в областта на производство на изделия чрез хидроформоизменение.

Апробация

Резултатите от дисертационния труд и основните положения в него са докладвани на:

- Национална студентска научно-техническа конференция 2006 - София
- Национална конференция по „Машиностроене и машинознание” 2009 - Варна
- 19th International Scientific Conference on AMME'2011 - Poland.
- Национална конференция по „Машиностроене и машинознание” 2012 - Варна
- Национална конференция по „Машиностроене и машинознание” 2013 - Варна

Предложените методи и средства за изследване и анализ на листови материали чрез хидравлично издуване са изпитани в лабораторията по пластична деформация на „РУ А. Кънчев”.

Публикации по темата на дисертацията и приноси

Основното съдържание на дисертационния труд е отразено в 5 научни публикации, от които 1 на английски език и 4 на български, публикувани в сборници от научни форуми с международно участие в България и Полша, посочени в края на автореферата.

На автора принадлежат постановката на задачите на изследване, новият подход и обновяването на основните лабораторни експерименти, разработването на метод и създаването на компютъризирана система за изпитване и анализ на двуосен опън чрез хидравлично издуване, разработване на системи за измерване, контрол, управление, всички описани изследвания, тяхното обработване, представяне, анализиране, обобщаване, изводи и приноси.

Обем и структура на дисертацията

Дисертационният труд е с обем 181 страници и се състои от увод, 5 глави, заключение, приноси на дисертацията, насоки за бъдещи изследвания, списък на цитираната литература - 206 заглавия и две приложения. Дисертацията съдържа 133 фигури и 29 таблици. Номерата на включените в автореферата фигури и таблици не съвпадат с тези в дисертационния труд „Изпитване на листови материали при двумерен опън чрез хидравлично издуване".

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. УВОД

Непрекъснатото развитие на технологичните процеси и появата на нови материали с повишени якостни характеристики поставят все по-големи изисквания към методите и апаратурата за изследване физико-механическите свойства на материалите. Преди всичко това се отнася за необходимостта от осигуряване на достатъчно пълен набор от експериментални данни с висока достоверност. Както е известно, ключовият фактор при формулирането на математичен модел, способен да отрази действителното поведение на материал и оптимално симулиране на процесите на обработката му, е солидната база експериментални данни. На съвременните изисквания не могат да отговорят адекватно широко използвани досега конвенционални методи за изпитване. Така например, информацията за пластичното поведение на металите, която дава класическото изпитание на опън, се оказва недостатъчна. Симулирането на процесите на формоизменение на листови метални материали се нуждае от данни за реакцията на материалите при значително по-високи степени на деформация, отколкото може да предостави изпитанието на опън. Преодоляването на това затруднение чрез въвеждане на корекционни коефициенти за отчитане на неустойчивостта след достигане на максимално натоварване при изпитването на опън крие опасност от допускане на големи неточности. По-пълна информация за поведението на материалите дава изпитанието на двумерен опън. Понастоящем са известни множество методи за реализиране схемата на натоварване при двумерен опън. При една част от тях изпитването се провежда в условията на триене между изпитвания образец и деформиращия инструмент. Това затруднява анализа и изчислението на характеристиките на материала и

може да доведе до отклонения от действителните им стойности. Този недостатък се избягва при методите на изследване, използващи течна среда в качеството на деформиращ агент. Един от тези методи, който в последно време има нарастващо приложение е хидравличното издуване на плоски образци. Интересът към него се засилва във връзка с появата на новите високо-якостни стомани и удобствата, които методът предоставя. Високата цена на специализираните машини за изследване по този метод засега ограничава тяхното по-широко навлизане в изследователските центрове и лаборатории. Има данни, че дори и в Япония се разработват различни варианти на по-евтини съоръжения за изследване на процеса на двумерен опън по метода на хидравличното издуване на листови материали.

У нас изследванията в тази област са в много ограничен обем. Колективът от секцията по обработка на металите чрез пластично деформиране и изследване на материалите към катедра „Материалознание и технология на материалите“ в Русенския Университет, който отдавна работи по проблемите на хидровзривната технология има известен опит и в прилагането на метода за изпитване чрез хидравлично издуване без да разполага със съответната съвременна екипировка. Необходимостта от компютъризирана екипировка понастоящем е от първостепенно значение за провеждане на прецизни, с достатъчна надеждност научни изследвания, особено върху новите материали с повишени якостни показатели. Екипировка, адекватна на съвременните машиностроителни технологии не само ще повиши рязко нивото на научно-изследователската дейност с всички благоприятни последици от това, но ще подобри съществено и качеството на учебния процес в областта на изследването и изпитването на материалите.

2. ЛИТЕРАТУРЕН ПОГЛЕД ВЪРХУ ИЗПИТВАНЕТО НА ЛИСТОВИ МЕТАЛНИ МАТЕРИАЛИ

2.1. Предварителни бележки

С развитието на машиностроенето и технологиите на обработване на листовите материали са разработени множество методи за тяхното изпитване. Разработката и непрекъснатото усъвършенстване на методите са свързани основно с необходимостта от адекватна оценка на поведението на листовите материали при деформиране. Появата на нови машиностроителни материали с повишени механични показатели изисква нови подходи и методи за тяхното изпитване.

2.2. Деформационни особености на листовите метални материали

Основните механични характеристики на металите се определят чрез стандартния метод на изпитване на едномерен опън, при който се записва кривата на натоварване, даваща зависимостта напрежение-деформация. След зоната на еластична деформация настъпва преходът на метала в еластично-пластично състояние, характеризиращ се с началото на процеса провлачване. Процесът на по-нататъшното пластично деформиране се реализира чрез приплъзване и двойникуване, и е съпроводен от драстично нарастване на броя

дислокации, при което протичат взаимодействия, както между тях, така и между дислокации и различни нехомогенности на микроструктурата - граници на кристалите, примесни атоми, междинни фази, неметални включвания. В резултат на тези процеси металът се уякчава. Големината на достиганата гранична деформация зависи от множество фактори: химическия състав, структурата, строежа на зърната, формата на разпределение на карбидите при стоманите, степента на еднородност, състоянието на повърхността на листа, характера на деформационно уякчаване, анизотропията и степента на еднородност на листовия материал. Анизотропията се оценява с коефициента на нормална анизотропия *R* предложен от *V. Lankford.* Той представлява отношението на логаритмичните деформации в две взаимно перпендикулярни направления на изследваната проба:

$$R = \frac{\varphi_2}{\varphi_3} = \frac{\ln(b/b_0)}{\ln(t/t_0)}, \qquad (2.1)$$

където: b_0 е изходната ширина на пробата; b е текущата ширина; δ_0 е изходната дебелина на пробата и $\boldsymbol{\delta}$ е текущата дебелина. При $R = 1$ листовият материал е изотропен, а когато $R > 1$ металът се деформира повече по ширина, отколкото по дебелина ($\delta_0/\delta < b_0/b$).

Нормалната анизотропия отразява изменението на свойствата на метала в направление перпендикулярно към плоскостта на листа, спрямо свойствата му в плоскостта. Стойността на този коефициент се променя в зависимост от ъгъла, който оста на пробата сключва с направлението на валцоване. Представа за анизотропията на листовия материал като цяло дава средният коефициент на нормална анизотропия изчислен по следната зависимост:

$$R_{cp} = \frac{1}{4}.(R_{0^\circ} + 2.R_{45^\circ} + R_{90^\circ}), \qquad (2.2)$$

където: R_{0°, R_{45° и R_{90° са частни коефициенти на анизотропия, определени върху пробни тела, изрязани съответно под *0°*, *45°* и *90°* спрямо направлението на валцоване.

Допълнителна информация за анизотропията дава и коефициентът на равнинна анизотропия изчислен по следната зависимост:

$$\Delta R_{cp} = (R_0 - 2R_{45} + R_{90})/2 \qquad (2.2')$$

Средната стойност на деформационно уякчаване n_{cp} се определя със зависимостта:

$$n_{cp} = \frac{1}{4}.(n_{0^\circ} + 2.n_{45^\circ} + n_{90^\circ}), \qquad (2.3)$$

където: n_{0° n_{45° и n_{90° са частни коефициенти на уякчаване, определени върху пробни тела, изрязани съответно под *0°*, *45°* и *90°* спрямо направлението на валцоване.

Степента на нееднородност на листовия метал се отчита чрез коефициента *f*, който представлява отношението на минималното и максималното съпротивление срещу пластично деформиране, измерено при конкретна дебелина на материала в различни места на листа:

$$f = \frac{(\sigma_p.t)\min}{(\sigma_p.t_i)\max}. \qquad (2.4)$$

2.3. Методи за изпитване на листови метални материали

Понастоящем много широко се използва изпитването на листовите метални материали на двуосен опън. Съществуват много разновидности на този метод, като всяка разновидност носи името на този изследовател, който я е приложил за първи път. Тук спадат методите на *Ериксен*, *Суифт, Фукуи*, *Олсен*, *Авери*, *Амслер*, *Мулен*, *Джовиньо* и др. Тези методи, характеризират деформируемостта на металите с помощта на разнообразни схеми на натоварване, които обикновено се избират с оглед обслужването на конкретно производство и при въвеждането на нови листови материали в практиката. През последните няколко десетилетия са разработени нови методи базирани на двуосен опън, които широко навлизат в практиката на изследването на съвременните листовите материали с повишени якостни показатели. Един от тях, силно конкуриращ останалите методи е методът на хидравлично издуване (ХИ). Той е вариант на метода използващ поансон с полусферично чело. Привлекателността на ХИ-метода се състои в отпадане на триенето между инструмента и листовия материал, което улеснява анализа. Най-важното предимство на метода в сравнение с класическото изпитване на опън е, че позволява да се изследва пластичното поведение на материала до достигане приблизително на два пъти по-голяма деформация (около *70%*). Като правило ХИ-метода се използва съвместно с изпитване на едноосен опън, който дава необходимата допълнителна информация за степента на анизотропия на изпитвания материал и коефициента на деформационно уякчаване.

ИЗВОДИ ОТ ГЛАВА 2

1. За оценка деформируемостта на листови материали понастоящем липсва един общоприет и стандартизиран метод. Използва се множество от методи, характеризиращи деформируемостта с помощта на разнообразни схеми на натоварване, които обикновено се избират с оглед обслужването на конкретно производство и при въвеждането на нови листови материали в практиката. Основна тенденция е усъвършенстване на известните методи и разработване на нови, които да дават разширени възможности за по-пълна и точна представа за деформируемостта на листовите материали, особено такива, произведени от нови сплави с повишени якостни характеристики и с по-малки дебелини.

2. За осигуряване надеждна оценка на деформируемостта на листовите материали, като правило, се използва комбинирано прилагане на няколко метода. Обикновено един от методите е изпитване на едноосен опън, даващ информация за числените стойности на якостта, относителното удължение, коефициента на деформационно уякчаване и степента на нормална и равнинна анизотропия на изпитвания материал. Много голямо приложение, като втори метод, има използването на някой от методите за изпитване на двуосен опън.

3. Тенденцията е да се използват методи, осигуряващи не само бързо и лесно получаване на възпроизведими резултати, но и притежаващи адекватна степен на подобие на напрегнатото и деформационно състояние, характерно за дадената производствена практика. При това, за улеснение на производителите на изделия от листови материали, резултатите от изпитанията обикновено се дават чрез

обобщени данни за максимално допустимите деформации, а не за допустимите напрежения, които по-трудно се възприемат интуитивно.

4. Методът за изпитване чрез хидравлично издуване на листови материали се превръща в един от основните методи за изследване механичните свойства на метали в машиностроенето. Приложението на този метод непрекъснато се разширява предвид по-широката и полезна информация, която осигурява в сравнение с други конвенционални методи на изпитване, особено във връзка с разработването на нови материали. Прилаганите различни подходи при избор на емпирични зависимости, лежащи в основата на изчисленията и обработката на данните от изпитването, понякога водят до получаването на чувствителни разлики между теоретично прогнозируеми и експериментални резултати.

5. У нас не се провеждат изпитания по метода на хидравлично издуване, липсва необходимата съвременна екипировка и натрупан опит, което може да се оцени като съществен недостатък в областта на изследване на механичните свойства, особено като се има предвид, че методът вече се използва и за много други неметални материали, включително и органична материя.

6. Липсва стандарт за изпитването чрез издуване на листови материали, поради което резултатите от изследвания, проведени в различни лаборатории, не могат да се съпоставят коректно и методът въпреки големите си предимства все още няма необходимата убедителна сила за практиката.

7. Недостатъчно изучени са някои въпроси относно изпитването чрез хидравлично издуване, свързани с геометричната форма на деформираните проби и законите на движение на материални точки от пробите при тяхното деформиране.

ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИЯТА

На основата на изводите от литературния преглед върху изпитването на листови метални материали и от теоретичния анализ на процеса хидравлично издуване, като се има предвид досегашния опит и състоянието на материалната база в катедра „Материалознание и технология на материалите” към Русенски унивеситет „Ангел Кънчев” и като се отчитат съвременните технологични изисквания към листовите метали, поставената **цел на дисертацията** е да се приложи методът на хидравлично издуване за изпитване на индустриални листови метали чрез създаване, тестване и използване на собствени методики, компютъризирани модули и програмни продукти.

За реализиране на така поставената цел на дисертацията са формулирани следните **основни задачи**:

1. Предвид липсата на стандарт за изпитване чрез хидравлично издуване да се направи предварителен теоретичен анализ на процеса и неговите основни параметри, от които зависи точността, надеждността и възпроизводимостта на получаваните резултати.

2. Да се разработи инструмент и екипировка за хидравлично издуване на листови метали, която да позволява провеждане на изследвания върху проби с различни диаметри и дебелини.

3. Да се разработят компютъризиран модул за листово деформиране чрез хидравлично издуване и софтуерен продукт за мониторинг на деформационния процес и за обработване и записване на опитните данни в реално време.

4. Да се разработят методика, компютъризиран модул и софтуерен продукт за автоматизиран тримерен анализ на формата и размерите на деформирани пробни тела.

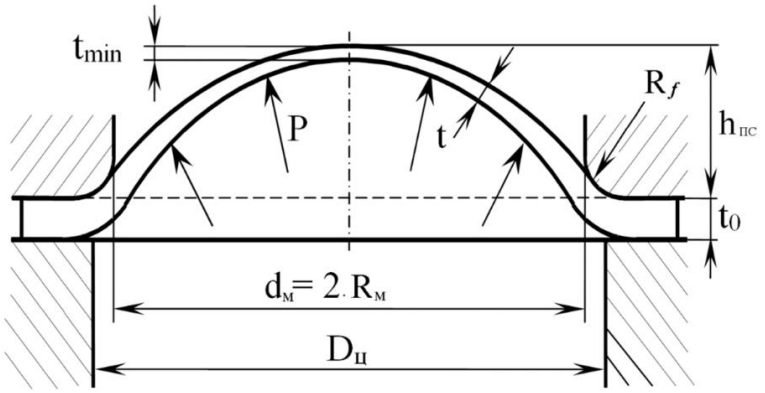
5. Да се проведат лабораторни изпитвания с помощта на разработените инструменти, модули и софтуерни продукти, като се използват проби от избрани широко използвани марки метални листи и се анализират данните с оглед на функционалните възможности на експерименталните средства за получаване на надеждни, възпроизведими и с достатъчна точност резултати.

6. Да се построят експериментални криви на деформационно уякчаване за избраните марки метални листи чрез изпитване на хидравлично издуване в кръгли матрици на проби с различни диаметри при степенно и непрекъснато деформиране.

3. ТЕОРЕТИЧЕН АНАЛИЗ НА ПРОЦЕСА ХИДРАВЛИЧНО ИЗДУВАНЕ

3.1. Същност и основни особености на изпитването чрез хидравлично издуване (ХИ)

Образецът от листов материал се закрепва в щанца с кръгъл отвор и се деформира под действието на налягане на течност (*фиг.3.1*). В резултат от фиксирането по целия контур на отвора, образецът се деформира приемайки куполообразна форма. Диаметрите на образците варират в граници между *30* и *200 mm.* В последно време се използват експериментални щанци най-често с диаметър на отвора *100 mm.* Специално за изследване влиянието на анизотропията се използват и щанци с елипсовиден отвор. Схемата на изпитване реализира двуосен опън. Във върхната точка на купола (полюс) се реализира балансиран двуосен опън и в нея напреженията и деформациите са максимални. С отдалечаване от полюса напрегнатото състояние се променя и в периферната зона на образеца се превръща в равнинен опън. Деформацията се оценява в полюса и в близост до него, където се счита че напрежението, меридианната деформация и радиусът на кривина имат еднородно разпределение.



Фиг. 3.1 Схема на изпитване чрез хидравлично формоване с кръгли матрици
[Туманова А.Т., Аверкиев А. Ю. [2], Фесчиев Н., Boulila A., Hsu T. C., Shamamy M. M.]

В процеса на изпитване се определят 3 параметъра - налягане на работната течност, дебелина и радиус на кривина в полюса, които служат за изчисляване на напреженията и деформациите в полюса и за построяване на зависимостта еквивалентно напрежение - еквивалентна деформация за изследвания материал.

3.2. Напрежения и деформации в полюса

Измерване на деформациите в полюса на образеца

За измерване на деформациите се използват най-често безконтактни методи базирани на използването на оптична и лазерна техника. Върху изследваната повърхност на образеца се създава поле от множество точки чрез напръскване с боя или с помощта на лъчисто проектиране. Фотокамерите и лазерните интерферометри снабдени със софтуерни продукти осигуряват скоростен автоматичен анализ на данните от проследяването преместванията на точките. Широко приложение понастоящем при изследванията с ХИ-теста има методът ARAMIS (точност на измерените деформации от $0{,}3\mu m \div 30\ \mu m$).

Друг оптичен метод, прилаган при ХИ-теста е 3D-ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry). Точността му е чувствително по-висока $0{,}03\ \mu m \div 0{,}35\mu m$.

За определяне на деформациите се използват и други автоматизирани системи: ASAME, TRITOP, PONTOS, ARGUS, FMTI мрежов анализатор и ICASOFT. С помощта на подобни методи става възможно лесното определяне и на скоростта на деформация. Освен определянето на деформациите, с помощта на посочените по-горе методи се изчисляват и напреженията в изследваните проби. Главен недостатък на горепосочените методи остава засега сравнително високата цена на апаратурата.

Определяне на еквивалентните напрежения и деформации

В основата на изчисленията на еквивалентните напрежения и деформации е уравнението на *Laplace* от мембранната теория:

$$\frac{\sigma_1}{\rho_1} + \frac{\sigma_2}{\rho_2} = \frac{P}{t}\ , \qquad (3.1)$$

където σ_1 и σ_2 са главните напрежения; ρ_1 и ρ_2 са радиусите на кривина в две меридианни сечения; P е хидравличното налягане; t е дебелина на материала в полюса.

Според теорията на *Hill*, ако са изпълнени следните условия и предпоставки:

- Формата на купола е сферична;
- Материалът е изотропен и се подчинява на критерия на *von Mises*;
- Листовият материал е достатъчно тънък, за да се пренебрегне напрежението на огъване;
- Липсва навлизане на материал в работната област на деформиране;
- Ако радиусът на закръгление в зоната на закрепване на листовия материал е по-малък от $d/20$ (d е диаметър на купола в основата) влиянието му може да се пренебрегне:

радиусът на кривина във всяко меридианно сечение е един и същ $\rho_1 = \rho_2 = R_{ПС}$, а напреженията в полюса са равни $\sigma_1 = \sigma_2$ и уравнението на *Laplace* се трансформира във вида:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{P.R_{ПС}}{2.t} \qquad (3.2)$$

За определяне на еквивалентните напрежения най-често се използва критерият на *von Mises*:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2}\left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2\right]} \qquad (3.3)$$

След заместване на $\sigma_1 = \sigma_2$ и $\sigma_3 = 0$ *в* уравнение (3.3) за еквивалентното напрежение се получава:

$$\bar{\sigma} = \sigma_1 \qquad \text{т.е.} \qquad \bar{\sigma} = \frac{P.R_{ПС}}{2.t} \qquad (3.4)$$

Следователно еквивалентното напрежение е равно по стойност на максималните напрежения в полюса.

Еквивалентната деформация също се определя по критерий на *von Mises*:

$$\varphi = \sqrt{\frac{2}{9}\left[(\varphi_1 - \varphi_2)^2 + (\varphi_2 - \varphi_3)^2 + (\varphi_3 - \varphi_1)^2\right]}; \qquad (3.5)$$

Като се вземат под внимание равенствата $\varphi_1 = \varphi_2$ и $2.\varphi_1 = -\varphi_3$, за еквивалентната деформация се получава:

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{9}\left(2.\varphi_1^2 - 4.\varphi_1.\varphi_3 + 2.\varphi_3^2\right)} = \sqrt{\frac{4}{9}(\varphi_1 - \varphi_3)^2} = \frac{2}{3}(\varphi_1 - \varphi_3) = \frac{2}{3}\left(-\frac{\varphi_3}{2} - \varphi_3\right) = -\varphi_3 \qquad (3.6)$$

Следователно еквивалентната деформация в полюса е равна на истинската деформация по дебелина в полюса:

$$\varphi = \ln\left(\frac{t_0}{t}\right). \qquad (3.7)$$

Радиус на кривината на образеца

Все още не е установено категорично каква е геометричната форма на повърхността на деформирания образец.

При предпоставката за сферичност, радиусът на сферата $R_{ПС}$ се определя по формула, следваща от прости геометрични съотношения:

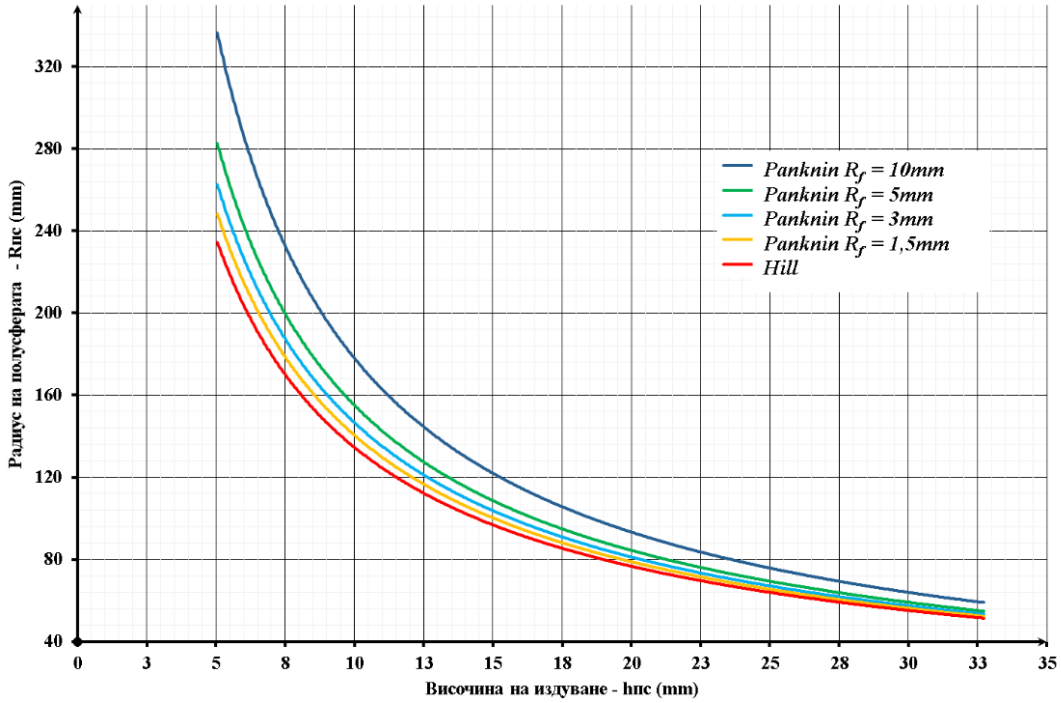
$$R_{ПС} = \frac{\left(\frac{d_м}{2}\right)^2 + h_{ПС}^2}{2.h_{ПС}}, \qquad (3.8)$$

където $d_м$ и $h_{ПС}$ са съответно диаметърът на отвора в матрицата и височината на деформирания образец.

С цел по-точно определяне на еквивалентните напрежения в уравнението се включва радиусът на закръгление в основата на матрицата R_f [Panknin W.]:

$$R_{ПС} = \frac{\left(\frac{d_м}{2} + R_f\right)^2 + h_{ПС}^2 - 2.R_f.h_{ПС}}{2.h_{ПС}}. \qquad (3.9)$$

Радиусът на закръгление, варира в доста широки граници *1,5÷10 mm* при различните изследователи и липсват препоръки за оптималната му стойност.



Фиг. 3.2 Радиус на полусферата по Hill и Panknin в зависимост от височината на издуване (диаметър на матрица Ø100 mm)

Ако радиусът е много малък или липсва такъв, разрушение се получава не в полюса, а в основата на матрицата. При голям радиус R_f се променя изследваната зона от образеца поради въвличане на материал в деформационното пространство, което опорочава експеримента.

Едно предварително изчисление на стойностите на $R_{ПС}$, определени по формулите на *Hill* и *Panknin* за матрица с диаметър *100 mm* е показано графично на *фиг.3.2.*

От получените резултати следва, че при използване формулата на *Panknin* кривите за еквивалентно напрежение ще бъдат разположени над тези получени по формулата на *Hill* и колкото по-голям е R_f, толкова по-голямо ще бъде отклонението. В резултат ще се получи нереално завишена зависимост за еквивалентното напрежение от еквивалентната деформация. За да се избегне това, очевидно е необходимо инструментът за провеждане на изследванията да има малък радиус на закръгление, но недостигащ стойности, превръщащи го в активен концентратор на напрежения.

Дебелина в полюса на образеца

За изчисление на дебелината на материала в полюса много често се използва формулата на *Hill* [Hill R.]:

$$t = t_0 \left(\frac{R_M{}^2}{R_M^2 + h_{ПС}^2} \right)^2 \qquad (3.10)$$

където R_M е радиус на отвора на матрицата, $h_{ПС}$ е височината на издутия образец.

Формулата се извежда, като се приеме, че измененията на меридианните деформации в полюса – $d\varepsilon_1$ и $d\varepsilon_2$, са право пропорционални на нарастването на височината и обратно пропорционални на радиуса на образеца:

$$d\varepsilon_t = d\varepsilon_2 = \frac{dh_{ПС}}{R_{ПС}} \qquad (3.11)$$

Формулата на *Hill* се получава само на базата на геометрични съотношения и поради приетите опростявания е валидна само в граници до *0,4* еквивалентна деформация [Sasawat Mahabunphachai, Muammer Koc], Освен това тя е е приложима за материали, които са със значителна предварителна уякченост. С цел да се разшири приложението й, в степенния показател е включено деформационно уякчаващото влияние чрез показателя на уякчаване *n* [Chakrabarty J.]:

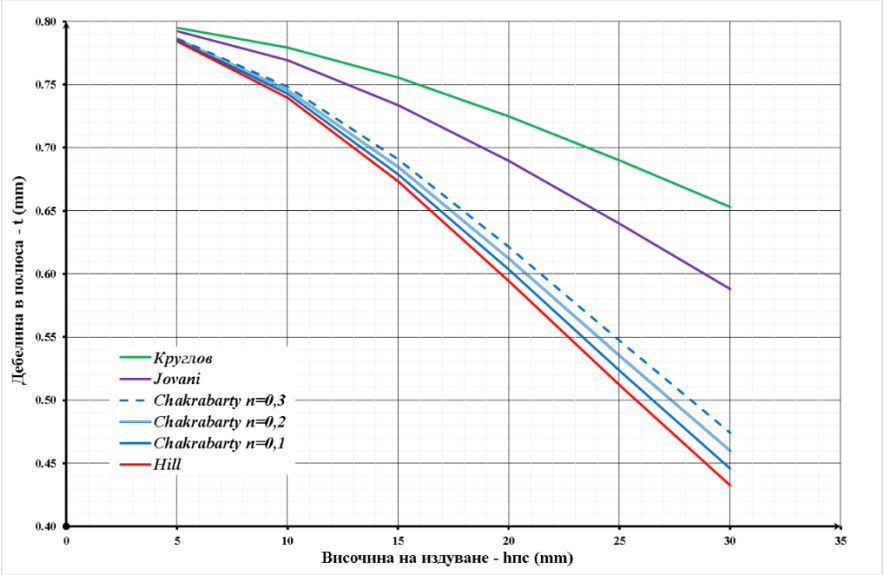
$$t = t_0 . \left(\frac{R_M{}^2}{R_M^2 + h_{ПС}^2} \right)^{2-n} . \qquad (3.12)$$

През 2002 г е предложена нова формула за изчисление на дебелината в полюса *Круглов* [Kruglov A. A.[2]]:

$$t = t_0 . \left[\frac{\frac{R_M}{R_{ПС}}}{Sin^{-1}\left(\frac{R_M}{R_{ПС}} \right)} \right]^2 \qquad (3.13)$$

Формулата на *Enikeev-Kruglov,* базирана също само на геометрични отношения, е предназначена за свръхпластични материали, но някои изследователи са получили задоволителни резултати от използването й при конвенционални машиностроителни материали.

Определен интерес представляваше сравнението на уравненията на *Hill*, *Chakrabarty*, *Jovane* и *Круглов* по отношение дебелината в полюса при различни степени на деформация. За целта бяха проведени изчисления за материал с дебелина *0,8 mm*, диаметър ма матрица *100 mm* и височина на издуване от *5* до *30 mm*, представени графично на *фиг.3.3*. Изчисленията по уравнението на *Chakrabarty* са извършени при три стойности на показателя на деформационно уякчаване – *n=0,1*; n=0,2 и *n=0,3*.



Фиг.3.3 Изменение дебелината в полюса в зависимост от височината на издуване при d_M=100 mm и начална дебелина на материала 0,8 mm

От получените резултати се вижда, че с нарастване на деформацията различните уравнения дават все по-големи отклонения. Уравненията, които се

отнасят за свръхпластични материали, както можеше да се очаква, предсказват по-малко намаление на дебелината, докато уравненията на *Hill*, *Chakrabarty* дават по-голямо намаление на дебелината и съответните криви са разположени много близко една до друга. За конвенционалните машиностроителни листови материали не може да се очаква пластично поведение, което да кореспондира с това на свръхпластичните материали, характеризиращи се със сравнително равномерно изтъняване при издуване. Следователно за по-нататъшните изчисления може да се разчита на уравненията на *Hill* и *Chakrabarty*.

3.3. Напрежения и деформации извън полюса

Нека да разгледаме произволна точка *M* от издутия образец (фиг.3.5) и поставим задачата за определяне на трите деформации в нея- φ_ϕ, φ_θ и φ_t (съответно - меридианна, кръгова и по дебелина).

От условието за постоянство на обема сумата от трите деформации трябва да е нула т.е.:

$$\varphi_\phi + \varphi_\theta + \varphi_t = 0, \qquad (3.14)$$

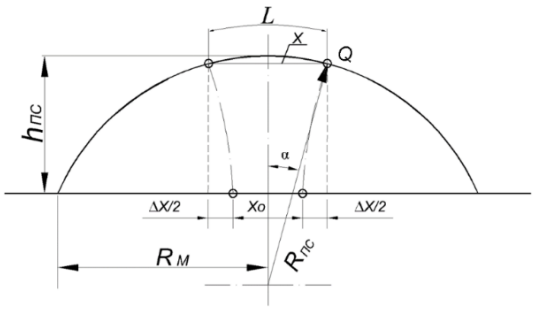
или:

$$\ln\frac{L_i}{r_{0i}} + \ln\frac{r_i}{r_{0i}} + \ln\frac{t_i}{t_0} = 0, \qquad (3.15)$$

където: L_i е дължината на дъгата L, съответстваща на началния радиус r_0 , а r_i е радиусът, съответстващ на началният радиус r_0; t_0 и t_i са съответно началната дебелина на изпитваният образец и дебелината в разглежданата точка след определена степен на деформиране(*фиг.3.4*).

При условие, че компютърният анализ е установил сферична форма на получения купол и е определен радиусът $R_{ПС}$, се измерват дължината на получения радиус – r_i и дължината на съответстващата полудъга - L_i. В разреза на дигиталния образ се измерва дебелината t_i на материала в точка *M* и при начална дебелина t_0 се получава стойността на истинската деформация ε_t в разглежданата точка. В уравнение (3.15) остава една неизвестна величина r_{0i}. Стойността на r_{0i}, може да се определи по два начина. Първият е чрез решаване на уравнение (3.15) спрямо r_0:

$$r_{oi} = \sqrt{\frac{r_i . L_i}{e^{\varepsilon_t}}} \; . \qquad (3.16)$$



Фиг. 3.4 Схема на измерване деформацията в полюса на образеца

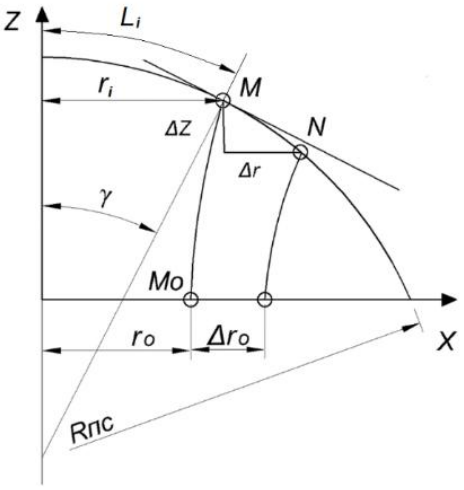
Вторият начин е чрез предварително сканиране на недеформирания образец. От цифровия образ се взема дължината на радиуса r_{0i} и при известна първоначална дебелина се изчисляват φ_ϕ, и φ_θ.

Първият метод е много удобен, тъй като за определянето на трите деформации е необходимо измерване само в една точка на издутия образец. Той има, обаче, съществен недостатък – неточното определяне на меридианната деформация в разглежданата точка чрез отношението на свързаната с нея дъга към съответния й радиус от недеформирания образец. Това отношение не дава

истинската стойност на φ_ϕ, а средната стойност на меридианната деформация за съответния участък от меридиана.

Точната стойност на φ_ϕ в произволна точка от купола може да се определи аналитично по следният начин (*фиг.3.5*). Точка M_0 след деформация е в положение M. При нарастване Δr_0 на началния й радиус r_0, то ще се удължи до дъга $\overset{\frown}{MN}$. Ъгълът при върха N на правоъгълния триъгълник е равен на ъгъла γ и при условие, че Δr_0 и r_0 са малки дължини, дъгата MN може да се замени с хипотенузата $\overline{MN}$.

Деформацията е: $\varphi_\phi = \ln\left(\dfrac{\overset{\frown}{MN}}{\Delta r_0}\right) = \ln\left(\dfrac{\overline{MN}}{\Delta r_0}\right)$; $\qquad MN = \dfrac{\Delta r}{\cos\gamma}$; . $\qquad$ (3.17)



Фиг.3.5 Схема за определяне на меридианната деформация

Ако нарастването на r_0 е безкрайно малко за меридианната деформация в т. M се получава:

$$\varphi_\phi = \ln\left(\frac{dr}{dr_0}.\frac{1}{\cos\gamma}\right). \qquad (3.18)$$

Меридианната деформация в т. M може да се изрази и по следния начин [Gleyzal A. N.]:

$$\varphi_\phi = \ln\left(\frac{\sqrt{dr^2 + dz^2}}{dr_0}\right) \qquad (3.19)$$

или $$\varphi_\phi = \ln\sqrt{\left(\frac{dr}{dr_0}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dr_0}\right)^2}. \qquad (3.20)$$

За експериментално определяне на траекторията на движение на материална точка от началото до края на деформационния процес е необходимо да се изследват дигиталните образи на серия от проби с различна степен на деформация. В резултат ще се получат точки от траекторията, например на движение на точката M от началото до определената степен на хидравлично издуване, уравнението на която се дефинира от използвания софтуер.

Както е известно, 3D-сканирането осигурява достатъчно висока точност на определяне позициите на конкретна точка в етапите на деформиране. Това ще даде възможност за достоверно математическо описание на траекториите на движение на точки от образец на даден материал.

На базата на получените стойности на деформациите в дадена точка, могат да се използват известните зависимости за връзката между деформации и напрежения при равнинно напрегнато състояние [Gagov V. et al.]:

$$\sigma_1 = \frac{P.R}{2t}, \qquad \sigma_i = \frac{\sqrt{3}.\sqrt{k}.\sigma_1}{2+\beta} \text{ и } \qquad \varepsilon_i = \frac{2.\sqrt{k}.\varphi_i}{\sqrt{3}}, \qquad (3.21)$$

където:

$$k = 1 + \beta + \beta^2, \qquad \beta = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{2.\alpha - 1}{2 - \alpha} = const \text{ и } \alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{2.\varepsilon_2 + \varepsilon_1}{2.\varepsilon_1 + \varepsilon_2} = const \qquad (3.22)$$

ε_1 и ε_2 - определените истински деформации в коя да е точка извън полюса на образеца.

3.4. Криви на деформационно уякчаване

Криви на уякчаване по данни в полюса

Теоретично погледнато експериментално получената крива $\bar{\sigma} = f(\varphi)$ би следвало да бъде продължение на кривата, снета от изпитанието на едномерен опън. Обикновено зависимостта $\bar{\sigma} = f(\varphi)$ е разположена над кривата от изпитанието на едномерен опън. С оглед осигуряване представителност на получените данни от хидравличното изпитване и удобство при използването им в практиката има опити за трансформиране на получените криви за $\bar{\sigma} = f(\varphi)$, така че да се явят продължение на кривите от едномерен опън [Govik A.]. Трансформацията се извършва като се прилага подходящо мащабиране на данните [Sigvant M.et al]. Подобна процедура е приемлива, ако предварително е извършена правилно корекцията за анизотропност на изследвания материал. Отчитането на анизотропията може да се извърши чрез корекционен множител, с който да се въведе поправка в данните за еквивалентно напрежение и еквивалентна деформация. Такъв множител може да се изведе от първия критерий на Hill (1948г.), който и до днес се използва с известен успех:

$$r_0.\sigma_y^2 + r_{90}.\sigma_x^2 + r_0.r_{90}.(\sigma_y - \sigma_x)^2 = r_{90}(r_0 + 1).\sigma_0^2, \qquad (3.23)$$

където: x и y означават съответно направлението на валцоване и перпендикулярното му направление, r_0 и r_{90} са отношенията на деформациите съответно по направление на валцоване и в перпендикулярно направление, σ_0 е напрежението при едномерен опън по посоката на валцоване.

В полюса на издутия образец, както вече беше споменато се реализира двумерно равномерно напрегнато състояние т.е. $\sigma_x = \sigma_y = \bar{\sigma}$, от което следва, че:

$$(r_0 + r_{90}).\bar{\sigma}^2 = r_{90}.(r_0 + 1).\sigma_0^2 \qquad (3.24)$$

и:

$$\frac{\sigma_0}{\bar{\sigma}} = \left[\frac{r_0 + r_{90}}{r_{90}.(r_0 + 1)}\right]^{1/2}. \qquad (3.25)$$

От тук следва, че еквивалентното напрежение на опън на анизотропния материал $\bar{\sigma}_{аниз.}$ може да се определи от уравнението:

$$\bar{\sigma}_{аниз.} = \bar{\sigma}_{изотр.}.\left[\frac{r_0 + r_{90}}{r_{90}.(r_0 + 1)}\right]^{1/2}. \qquad (3.26)$$

Аналогично може да се изведе подобна зависимост от втория критерий на *Hill* (1978г.)

$$(\sigma_1 + \sigma_2)^2 + (1 + 2.R).(\sigma_1 - \sigma_2)^2 = 2.(1 + R).\sigma_0^2, \qquad (3.27)$$

т.е.:

$$\bar{\sigma}_{аниз.} = \bar{\sigma}_{изотр.}.\sqrt{\frac{2}{1 + R}}, \qquad (3.28)$$

където: R е коефициента на нормална анизотропия.

Следва да се отбележи, че корекцията, която се извършва с константен коефициент на анизотропия може да се окаже недостатъчна за осигуряване плавно продължение на кривата на уякчаване, получена при едномерен опън от кривата получена от ХИ-теста. Получаването на по-големи отклонения в областта на по-високи деформации може да е резултат от изменения на

коефициента на анизотропия, за които свидетелстват, както наши изследвания[Гагов В.[6]] така и изследвания на други автори проведени в последно време [Aleksandrovic S.].

Криви на уякчаване по данни извън полюса

Липсват подробни сведения за възможностите да се построят криви на уякчаване на листови метали по експериментални данни от хидравлично издуване за точки извън полюса на изпитваните образци. По-рано в катедрата [Gagov 2003] са проведени предварителни изследвания на стомана 08кп и месинг CuZn30 чрез хидравлично изпитване и е направен опит за построяване на кривите на уякчаване.

Експерименталното определяне на деформациите и главните радиуси на кривина в точки извън полюса може да се извърши по различни методи, например с помощта на координатни мрежи, чрез тримерно сканиране и др (т.3.2). Изборът на подходящ метод зависи от такива показатели като достижима точност, достъпно оборудване, трудоемкост и др. Възможно е съществено опростяване на експерименталните и изчислителните процедури, ако от други паралелни изследвания са известни например формата на деформирания купол, разпределението на дебелината в меридионалните сечения на купола и др.

ИЗВОДИ ОТ ГЛАВА 3

1. Процесът на деформация на листови материали чрез издуване е добре изучен теоретически. Математическото описание на процеса се базира на мембранната теория. За ползване на математическия апарат изследователите прибягват до известни опростявания, които водят към неточности в крайните резултати и по-специално в получените зависимости за еквивалентно напрежение-еквивалентна деформация $\bar{\sigma} - \varphi$.

2. За правилното определяне на зависимостите $\bar{\sigma} - \varphi$ е необходимо прецизно определяне при изпитване чрез хидравлично издуване на три основни параметри – налягане P, радиус на кривината на издутата повърхност $R_{ПС}$, дебелина в полюса t, както и отчитане влиянието на анизотропията.

3. Изпитването чрез хидравлично издуване, въпреки редица други негови предимства, не дава възможност да се установи с достатъчна достоверност големината на анизотропията, дори и при материали с високи степени на анизотропия. Предвид на това се налага успоредно с хидравличното изпитване да се провежда изпитване и на едномерен опън, който дава необходимата информация за анизотропията.

4. За събиране на данни за деформационното поведение на изследвания листов материал е необходимо използване на образци с различни по големина изпитвани площи. Най-често на изпитване се подлагат образци с диаметър на изследваната зона Ø100mm.

5. В процеса на изпитване може да има частично навлизане на материал в изследваната зона от страна на периферната част на образеца, с която той се закрепва в инструмента. Предвид на това, че такова въвличане на материал поставя под съмнение получаваните данни, е необходимо да се вземат мерки за

минимизиране на този процес. Основните фактори, които влияят върху него са: формата и разположението на притискащия околовръстен канал, големината на радиуса в долната част на матрицата и силата на притискане на образеца.

6. Въпреки квазистатичния характер на натоварване, при изпитване чрез хидравлично издуване е необходимо по възможност да се осигури постоянна скорост на деформация, а не постоянен дебит на работната течност.

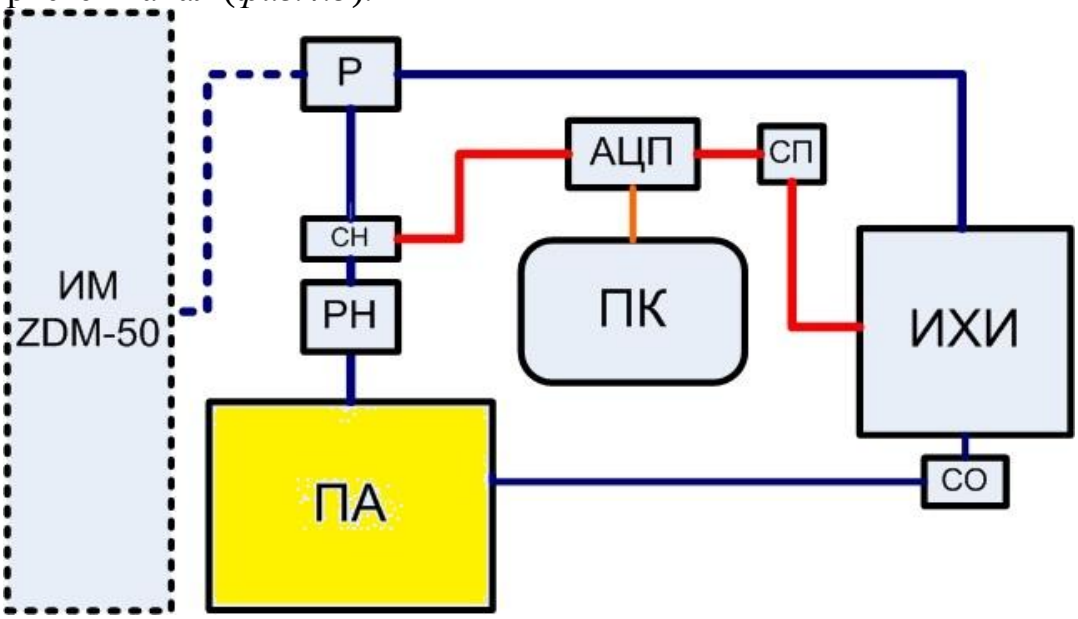
7. Съществуват слабо използвани досега възможности за експериментално построяване на кривите на деформационно уякчаване на листови метали при изпитване по метода хидравлично издуване чрез допълнително определяне на еквивалентните напрежения и деформации извън полюса на изпитваните образци.

4. РАЗРАБОТВАНЕ НА КОМПЮТЪРИЗИРАНИ МОДУЛИ ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА ИЗСЛЕДВАНИЯТА

Разработената система се състои от два модула: модул за пластично деформиране (МПД) на образци от листов материал, чрез хидравлично издуване (ХИ) и модул за компютърен анализ (МКА) на пластично деформирани образци.

4.1. Модул за пластично деформиране (МПД)

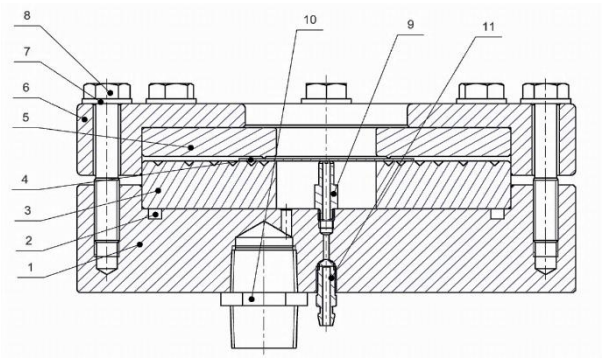
Блок-схемата на МПД е показана на *фиг.4.1*. Разработеният инструмент за хидравлично издуване (ИХИ) има съставна конструкция, позволяваща изпитване на образци с диаметър в граници *40÷130 mm* (*фиг4.2*). Чрез симулиране на процеса са определени: необходимото усилие за натягане на винтовете, радиусът на закръгление на долния ръб на матрицата, формата и размерите на фиксиращия околовръстен канал (*фиг.4.3*).



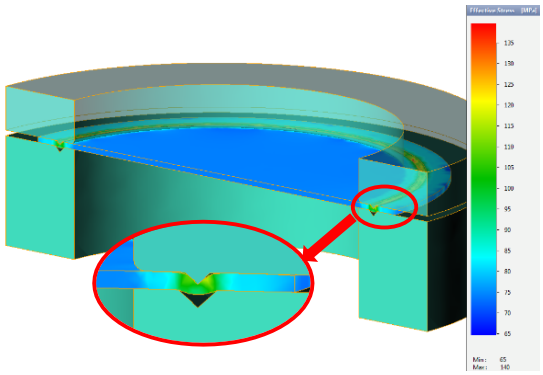
Фиг. 4.1 Блок-схема на модул за пластично деформиране – ИХИ – инструмент за хидравлично издуване, СО – система за обезвъздушаване, СП – сензор за преместване, АЦП – аналогово-цифров преобразувател, ПК - персонален компютър, ПА – помпен агрегат, РН – регулатор на налягане, СН – сензор за налягане, Р – разпределител и ИМ – универсална изпитвателна машина ZDM-50

В процеса на деформиране се следят налягането и височината на издуване на образеца. Първият параметър се следи със сензор за налягане *Kobold–Sen-3376*, а вторият параметър - с електромеханичен сензор, монтиран върху предпазния прозрачен капак (*фиг.4.4*).

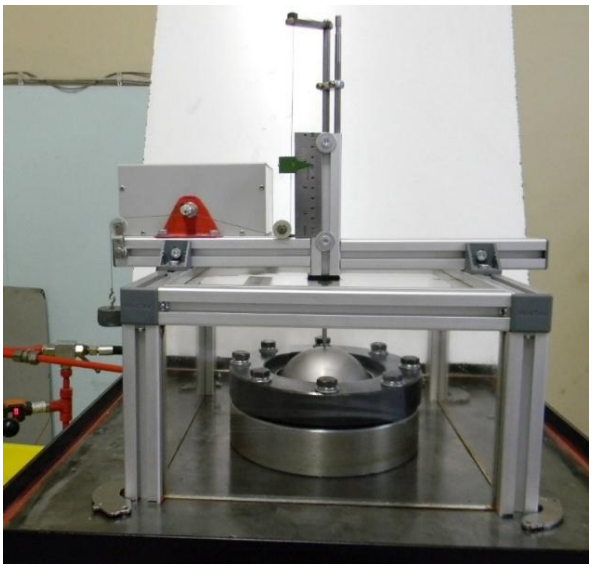
Информацията от двата сензора се визуализира с числени стойности посредством съответните им тарировъчни характеристики. Преди провеждане на всяка серия експерименти се извършва нулиране и калибриране на двете сензорни системи.



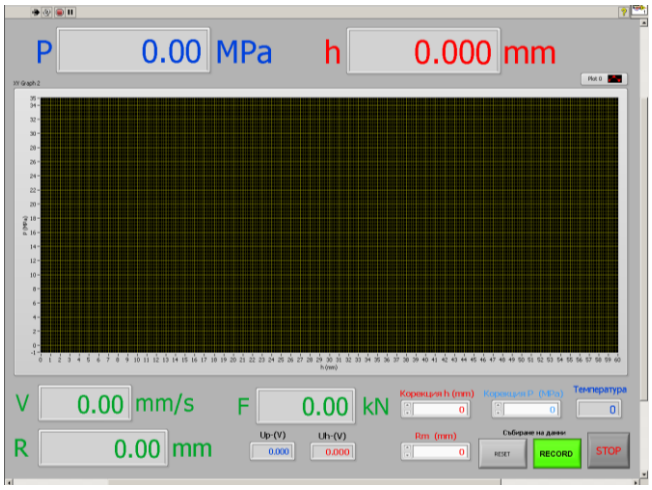
Фиг.4.2 Инструмент за хидравлично издуване



Фиг.4.3 Напрежения в образеца при създаване на спиращият ръб



Фиг. 4.4 Общ вид на възела за хидравлично издуване



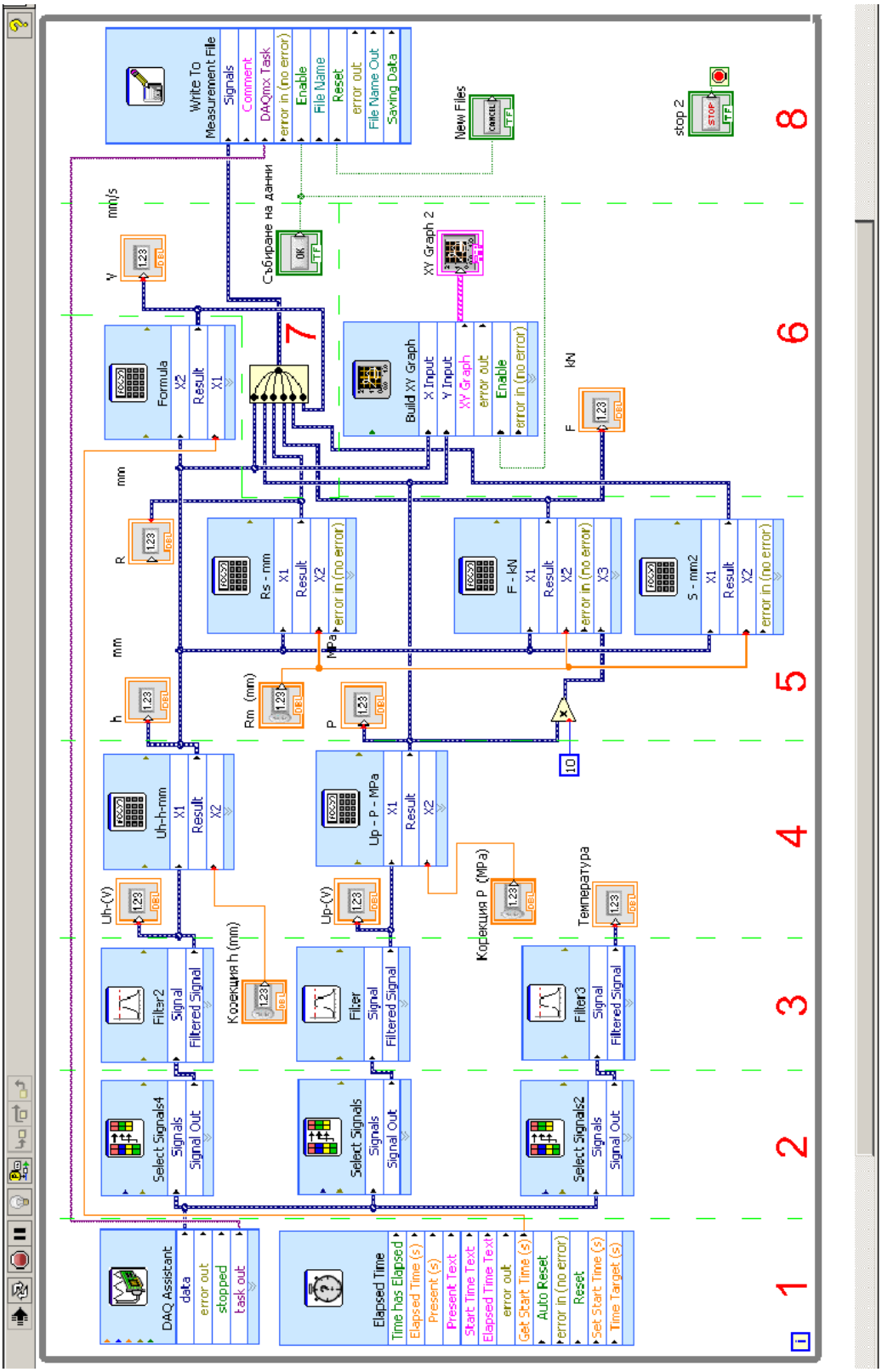
Фиг. 4.5 Информационен панел

4.2. Софтуерен продукт – *Hydro Forming Materials* (*HFM*)

За компютъризирането на системата е разработен софтуерен продукт *HFM-v.1.4*. с помощта на софтуерния продукт „*LabView*“ на *National Instruments*. Той се състои от две части: информационен панел и блок-изчислителен.

Информационният панел осигурява мониторинг на процеса. В задачите на мониторинга са включени: непрекъснато визуализиране процеса на деформиране с индикация на основните параметри - налягане, височина на издуване, радиус на издутия купол, скоростта на деформиране, силата действаща върху винтовете

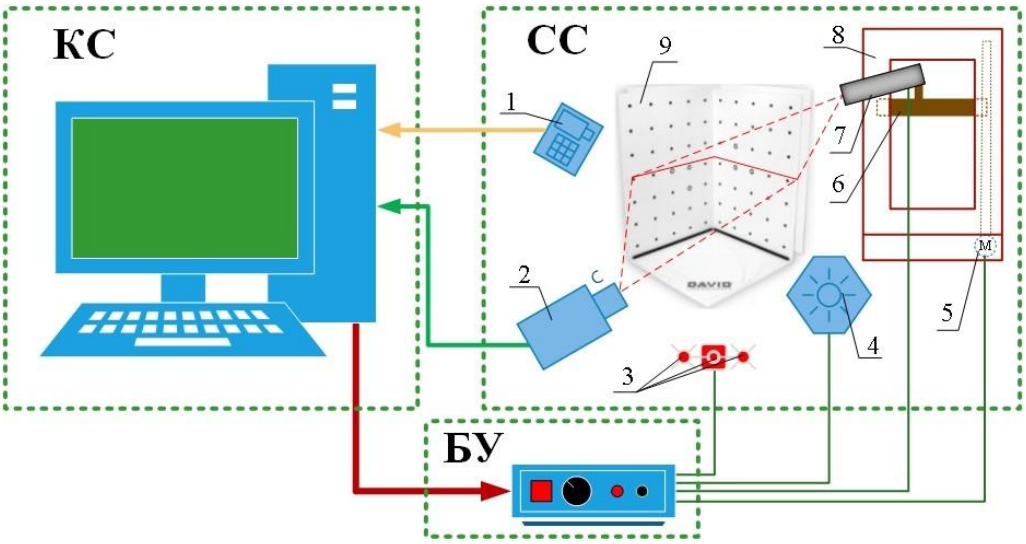
и температурата на околната среда. Освен информационната функция на панела, той служи и за задаването на конкретни команди (*фиг.4.5*). Изчислителният блок е програмиран да поема потока от данни постъпващи от АЦП (*NI USB-6008*) контролер, да ги обработва, представя и записва в подходящ вид (*фиг.4.6*). На базата на направените проверки с различни по размер плоско паралелни плочки беше определена точността, с която системата отчита преместването *±0,0025mm*. Средното отклонение не надвишава *0,04%*.



Фиг.4.6 Блок - диаграма на потока от данни.

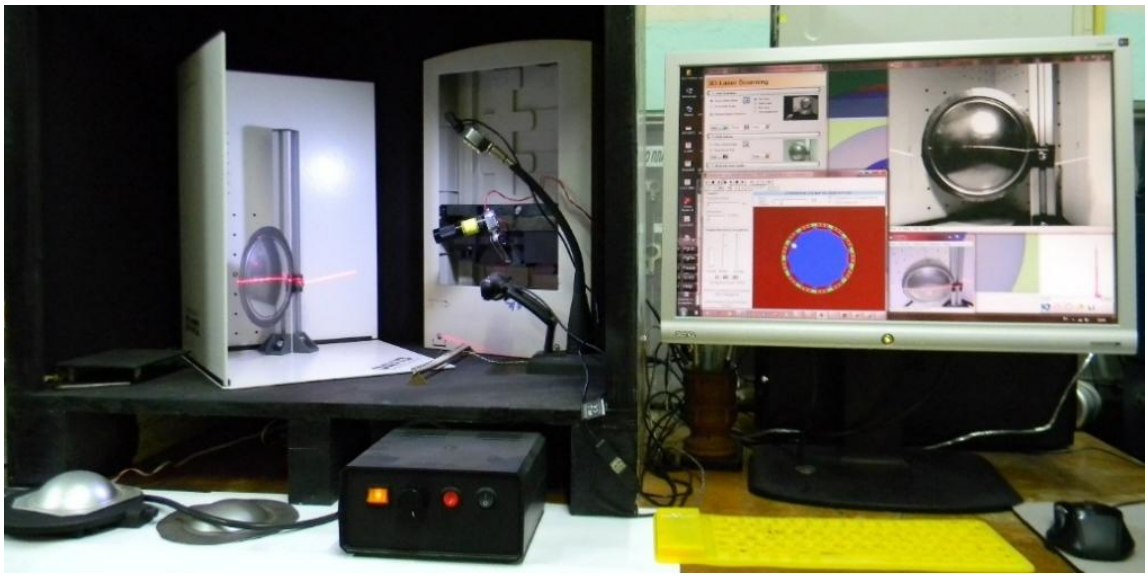
4.3. Модул за тримерен анализ на деформирани проби

Модул 2 - МКА се състои от система за лазерно сканиране, компютърна система и блок за управление (*фиг. 4.7*, *фиг. 4.8*)



Фиг.4.7 Блок схема на модул 2

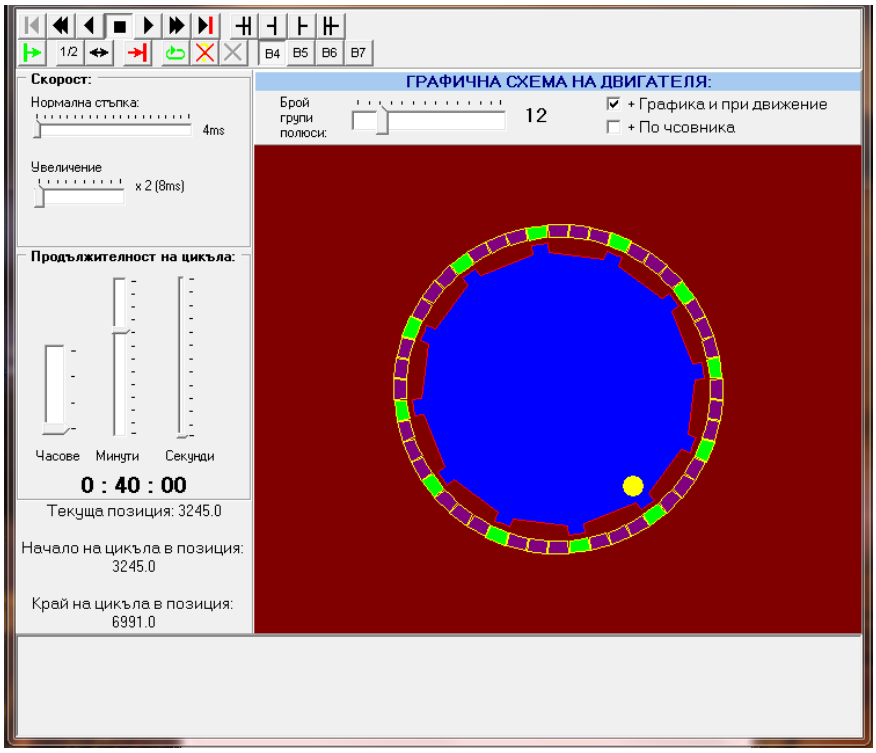
За получаването на качествен цифров образ чрез зададена скорост и граници на сканиране е разработен софтуерен продукт *MC-3DSC* (*фиг.4.9*). Той е снабден с възможност за ръчно задаване импулси в границите от *8ms* (с увеличение x2) до *3200ms* (с увеличение x16).При автоматичен режим се задава продължителност на цикъла в границите от *4s* до *3:59:59* часа. За оценка на точността на получения сканиран обект бяха използвани плоско-паралелни плочки. Получаваното отклонение от точността на сканиране бе *±0,003 mm*.



Фиг.4.8 Общ вид на модул 2

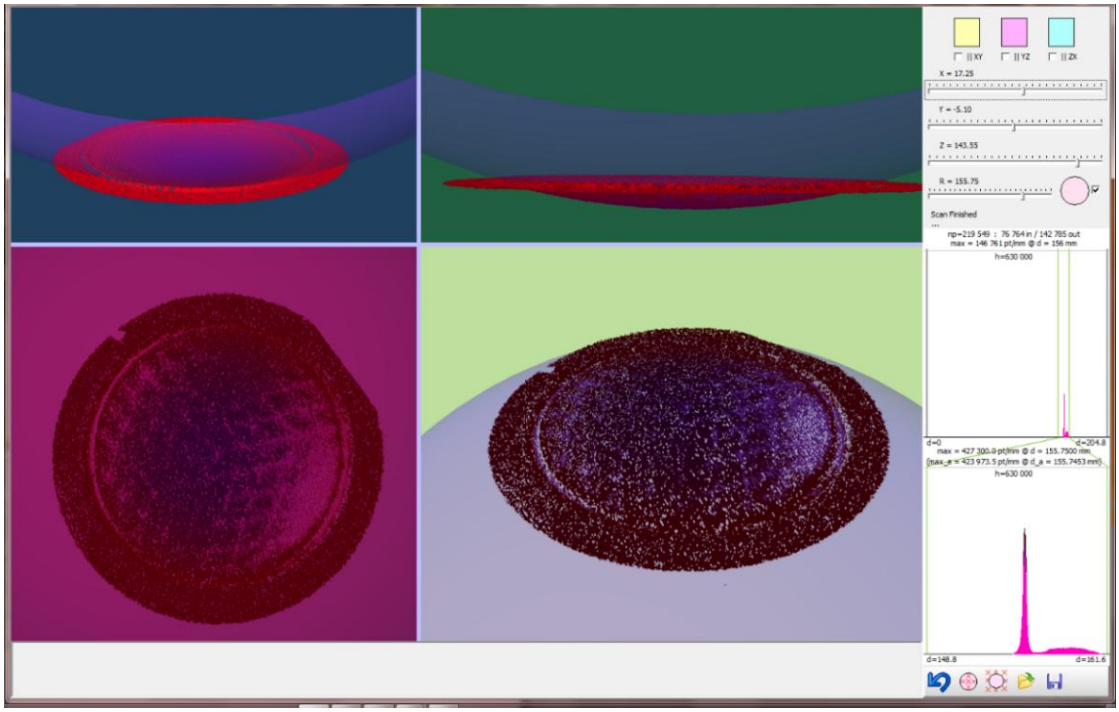
В разработения софтуер *SA-3DSC v.1.2* е заложено създаване на втори образ с форма на сфера, който да служи като шаблон. Сферичният шаблон е с регулируем радиус в границите от *8 mm* до *200 mm*. Сравняването на образеца с шаблона се визуализира на панела за анализ на мониторния екран. За целите на сравнение са предвидени четири променящи се по размери прозорци, които се

появяват едновременно. В тях цифровият образ се разполага в трите основни равнини *XY*, *XZ* и *YZ*, а в четвъртия образът е в аксонометричен изглед (*Фиг.4.10*).



Фиг.4.9 Управляващ панел на сканиращата система

Във всеки прозорец е предвидена възможност за завъртане на обекта по-подходящ начин, с оглед пълно представяне на анализираната повърхност. Софтуерът изчислява текущия радиус, и го визуализира на панела за анализ. Точността на изчисления радиус се представя на екрана на монитора с неговото отклонение. Заложено е извеждането на резултатите с точност пет знака след десетичния знак.



Фиг.4.10 Панел на софтуерен продукт SA-3DSC за анализ

4.4. Функционална годност на разработената система

Разработената система е изпълнена в лабораторията по обработване на материалите чрез пластична деформация на Русенския университет и беше подложена на проверка за установяване на нейната функционалност преди пристъпването към основните експерименти.

5. МЕТОДИКА НА ИЗСЛЕДВАНИЯТА

5.1. Изследвани материали

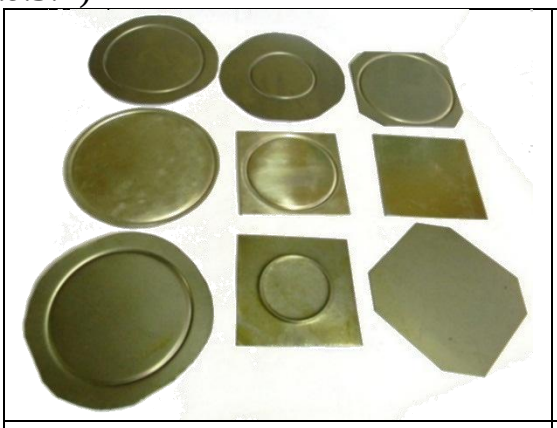
За провеждането на експерименталните изследвания са използвани следните листови материали:

- стомана нисковъглеродна *08кп* (EN 1.0330) с дебелина *0,8 mm*;
- стомана *X5CrNi18-10* (EN 1.4301) с дебелина *0,8 mm* и *0,6 mm;*
- алуминий-*Al99,5* (ENAW-1050A) с дебелина *1,5 mm.*

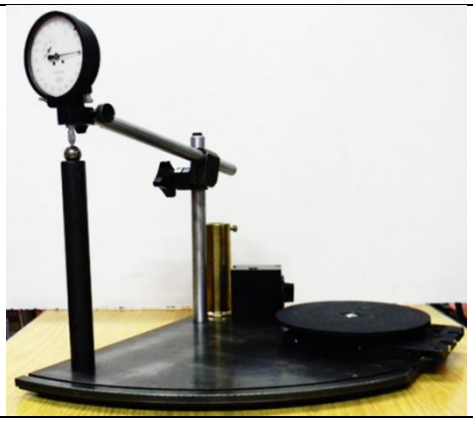
Данните за химическия състав и механичните показатели на листовите материали според съпровождащите ги сертификати са проверени и потвърдени експериментално в лабораторията по изпитване и изследване към катедра МТМ и допълнително във външна независима лаборатория.

5.2. Методика за изследване при двумерен опън

Пробните тела за двумерен опън се разкрояват от листовия материал така, че да осигурят необходимата площ на изпитване и достатъчна по ширина периферия за притискане. Формата и размерите на заготовките зависят от диаметъра на матрицата. Преди изпитанието с помощта на изпитвателна машина на натиск *МС-2000* в образците се оформя предварително фиксиращият канал (*фиг.5.1*)



Фиг. 5.1 Пробни тела за двумерен опън



Фиг.5.2 Приспособление за проверка на дебелината и разчертаване на кръгови мрежи

В първата серия изследвания образците от различните материали бяха деформирани до настъпване на разрушение с помощта на щанците с диаметри *Ø40, Ø50, Ø65, Ø80, Ø100* и *Ø125 mm* с цел установяване максимално възможната степен на деформация и максималното налягане. При следващите експерименти образците бяха изследвани при различни степени на деформиране, задавани чрез височината на получавания купол при издуване.

Експериментите бяха провеждани с две групи образци – без нанесена мрежа върху повърхността им и с нанесена мрежа. Предназначението на първата група е за определяне на зависимостите истинско напрежение – истинска деформация чрез изследване на образците в полюса. Втората група образци е за изследване на деформациите извън полюса. За образците от втората група беше разработено приспособление за нанасяне на мрежа по механичен път(*фиг.5.2*). Мрежата се състои от серия концентрични окръжности и поне два взаимно перпендикулярни диаметъра – по посока на валцоване и в перпендикулярно направление.

Всеки образец след деформиране се сканиране в модул 2 и се подлага на автоматизиран тримерен анализ. По време на сканирането на монитора се визуализира процесът на създаване на образа. Последователно се сканират двете повърхности на образеца, след което обединението им се извършва в софтуерния CAD продукт. Запазените повърхности се използват за анализ и оценка на получения профил на образците, чрез разработения софтуерен продукт *SA-3DSC*. С помощта на сферичен шаблон се провежда сравнителен анализ на сканираната повърхност на образеца. В резултат на този анализ се установява дали повърхността е сферична или част от нея има формата на сфера. В случай на сферичност, системата извежда на екрана стойностите на радиусите на горната и долната повърхност с техните отклонения. Във всеки момент се извежда и конкретна изчислена стойност на радиуса на средната повърхност.

За определяне на дебелината в полюса и извън него се използва числово измерване върху разрез на образеца минаващ през полюса. Получените данни за дебелината се проверяват с помощта на разработено приспособление, снабдено с индикаторен часовник: кл. *I-ви* и точност *0,001 mm.*

5.3. Методика за изследване при едномерен опън

Формата, габаритните размери и допустимите отклонения на размерите на пробите са по стандарт *ISO 6892-1:2009.* Пробите са изрязани от листовия материал по три направления *0˚, 45˚* и *90˚* спрямо направлението на валцоване Изпитването е проведено с универсална изпитвателна машина *Instron- 3384* управлявана с компютърна система и снабдена с програмен продукт „*Bluehill-3*“.За провеждане на изследванията с изпитвателната машина са разработени и приложени два метода:

- Метод за определяне на механичните показатели при едномерен опън;
- Метод за определяне наличието на анизотропия при едномерен опън за избраните листови материали.
-

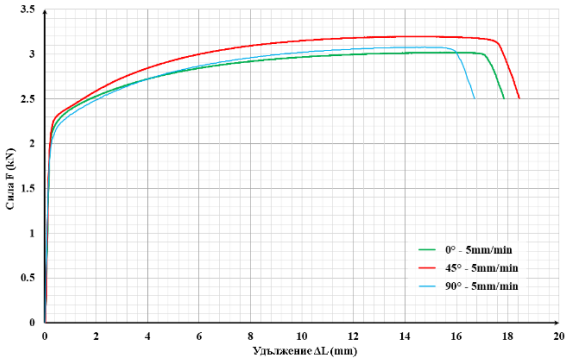
6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ И АНАЛИЗ

6.1. Кривите на уякчаване при едномерен опън

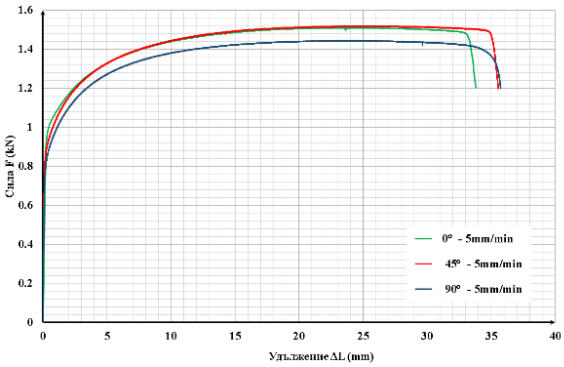
За построяване кривите на уякчаване от всеки материал са изпитани по петнадесет образци – по пет за всяко направление (*0º, 45º* и *90º*) спрямо направлението на валцоване. От проведения анализ на индикаторните диаграми за всеки материал са избрани представителни диаграми, стойностите на

механичните показатели на които са най-близки до изчислените средни стойности на показателите във всяка група (*фиг.6.1.- фиг.6.4*).

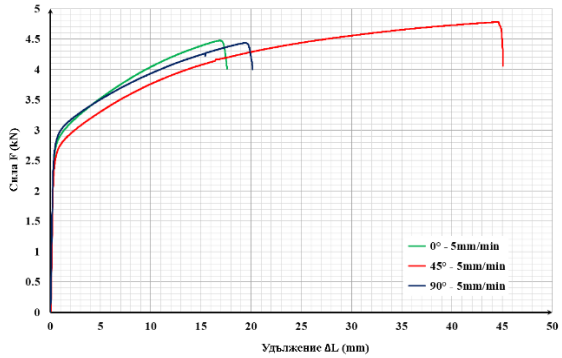
Зависимостите са трансформирани в координати истинско напрежение-истинска деформация и са показани на *фиг.6.5. – фиг.6.8*. Получените криви на уякчаване кореспондират на литературните данни за изследваните листови материали. Както се вижда, ъгълът на направлението спрямо посоката на валцоване не оказва забележимо влияние върху взаимното разположение на кривите на уякчаване. Прави впечатление, че при аустенитната стомана по направление *45°* деформацията е значително по-голяма отколкото по другите две направления *0°* и *90°*, в резултат на което се получава и максимална якост на опън по това направление.



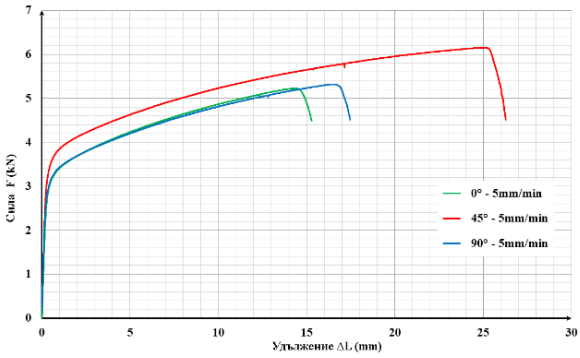
Фиг.6.1 Представителни индикаторни диаграми на стомана 08кп, t_0=0,8 mm



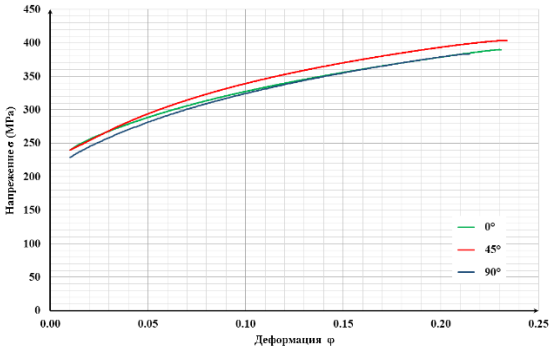
Фиг.6.2 Представителни индикаторни диаграми на Al 99,5 t_0=1,5 mm



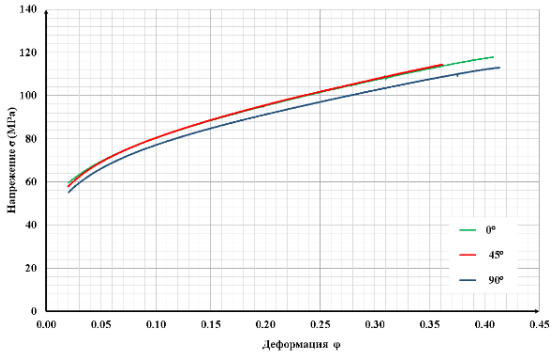
Фиг.6.3 Представителни индикаторни диаграми на стомана X5CrNi18-10;t_0=0,6 mm



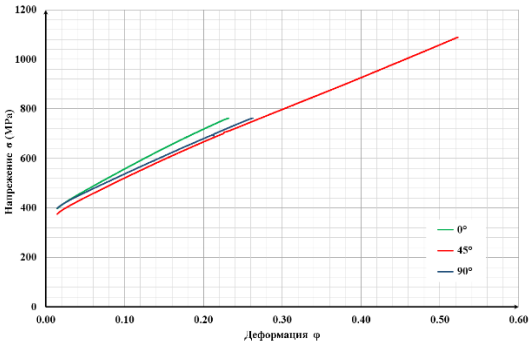
Фиг.6.4 Представителни индикаторни диаграми на стомана X5CrNi18-10; t_0=0,8 mm



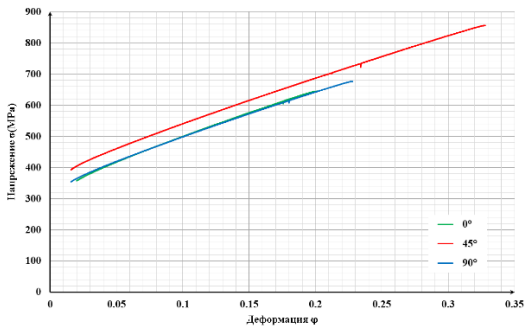
Фиг.6.5 Криви на уякчаване на листов материал 08кп, t_0=0,8 mm



Фиг.6.6 Криви на уякчаване на листов материал Al 99,5 t_0=1,5 mm



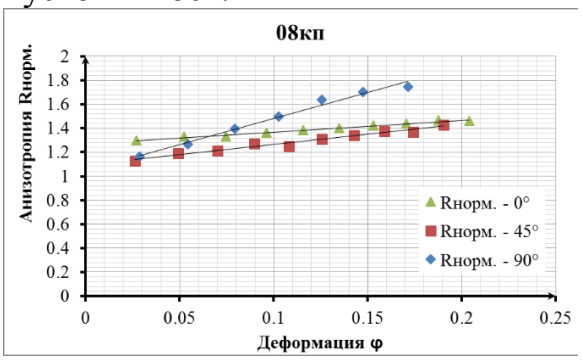
Фиг.6.7. Криви на уякчаване на листов материал X5CrNi18-10;t_0=0,6 mm



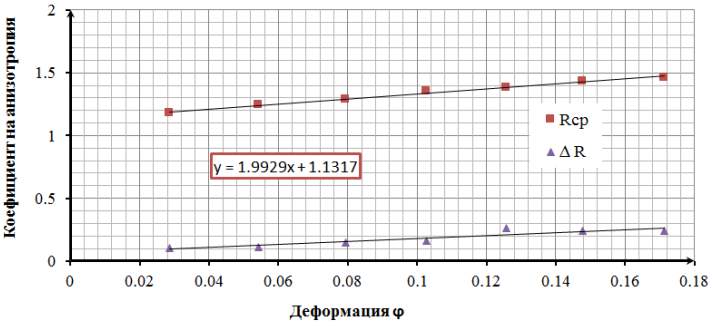
Фиг.6.8. Криви на уякчаване на листов материал X5CrNi18-10; t_0=0,8 mm

6.2. Определяне анизотропията на листовите материали.

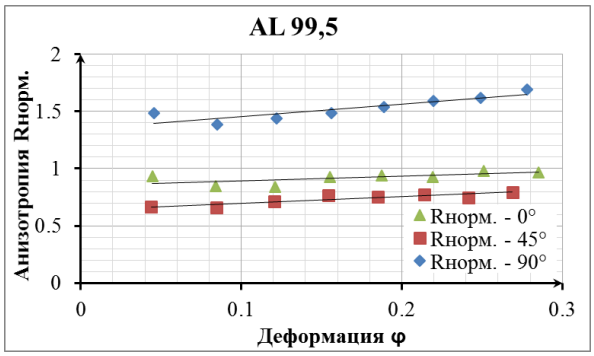
Определените механични характеристики якост на опън и относително удължение са взети под внимание при изпитване за определянето на анизотропията на листовия материал. Определени са частните коефициенти на анизотропията на материалите $R_{0°}$, $R_{45°}$ и $R_{90°}$ и са построени зависимости за изменението им по трите направления (*фиг. фиг.6.9, 6.11, 6.13, 6.15*). Също така са определени коефициентите на средната нормална анизотропия и на средната равнинна анизотропия (*фиг. фиг.6.10, 6.12, 6.14, 6.16*). Получените зависимости показват, че частните коефициенти на нормална анизотропия не са константи, както много често се приема, а са променливи - нарастват с повишаване степента на деформиране. С изключение на аустенитната стомана с дебелина *0,6 mm* средните коефициенти на нормална анизотропия и на равнинна анизотропия също така са нарастващи функции на степента на деформиране. Тези резултати показват, че използването на постоянен коефициент на анизотропия, определен при общоприетата степен на деформиране - *20%*, би могло да доведе до неточност при получаване по-нататък на диаграмата на уякчаване при двумерен опън. Затова частните коефициенти на анизотропия и средният коефициент на нормална анизотропия следва да се определят до по-високи степени на деформиране. Ето защо в настоящия труд е прието техните стойности да се определят до степен на деформация, отговаряща на началото на загуба на устойчивост.



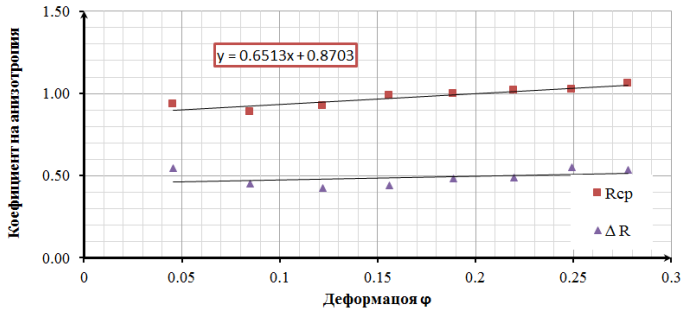
Фиг.6.9. Зависимост на $R_{норм.}$ от степента на деформация - 08кп, t_0=0,8 mm



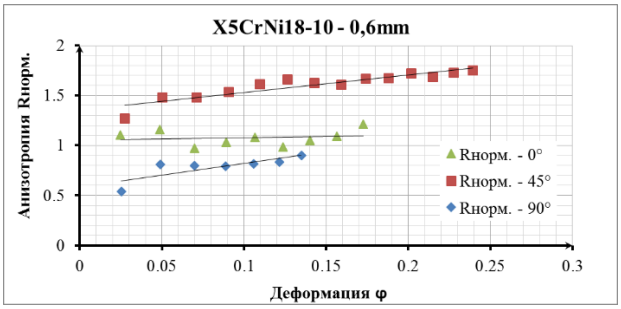
Фиг.6.10. Зависимост на $R_{ср}$ и ΔR от степента на деформация на 08кп, t_0=0,8 mm



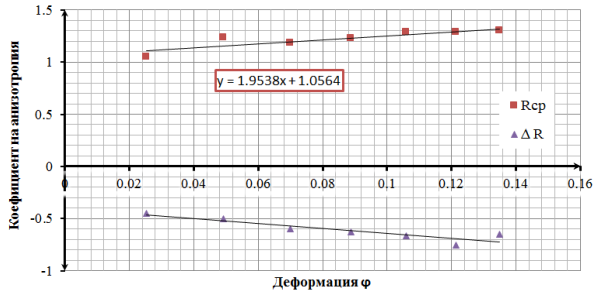
Фиг.6.11 Зависимост на $R_{норм.}$ от степента на деформация - Al 99,5, t_0=1,5 mm



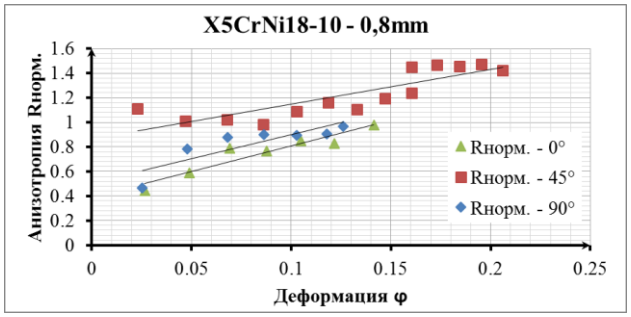
Фиг.6.12 Зависимост на $R_{ср}$ и ΔR от степента на деформация на Al 99,5, t_0=1,5 mm



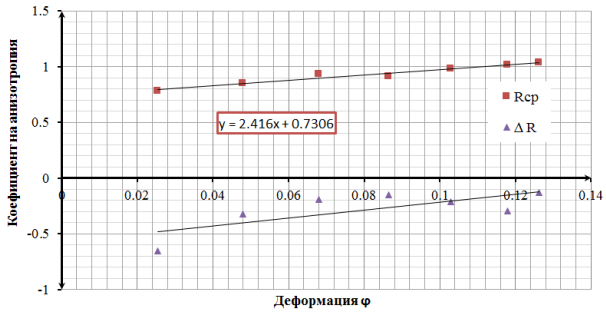
Фиг.6.13 Зависимост на $R_{норм.}$ от степента на деформация - X5CrNi18-10, t_0=0,6 mm



Фиг.6.14 Зависимост на $R_{ср}$ и ΔR от степента на деформация на X5CrNi18-10, t_0=0,6 mm



Фиг.6.15 Зависимост на $R_{норм.}$ от степента на деформация - X5CrNi18-10, t_0=0,8 mm



Фиг.6.16 Зависимост на $R_{ср}$ и ΔR от степента на деформация на X5CrNi18-10, t_0=0,8 mm

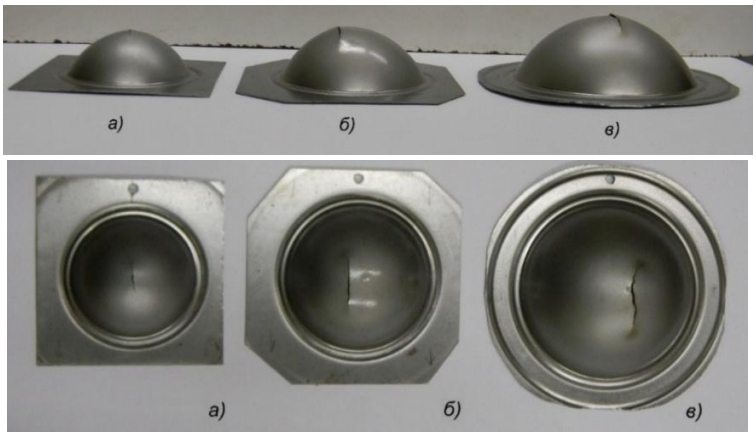
6.3. Криви на уякчаване при двумерен опън

Индикаторни диаграми при двумерен опън

В основата на построяването на диаграмите на уякчаване служат резултатите от експерименталното определяне на трите основни параметъра при двумерен опън - налягане P в системата в процеса на деформиране, височина на издуване h_{nc} и дебелина в полюса на образеца t_{min}. Първите два параметъра се определят в реално време т.е. по време на издуването на образеца в Модул 1. Дебелината се определя чрез компютърно измерване на цифровия му 3D образ в Модул 2. При доказана сферичност от проведения компютърен анализ в полюса на образеца, се определя радиусът на средната повърхност по дебелина на образеца. На базата

на получените резултати се изчисляват истинските стойности на напреженията и деформациите.

Както беше посочено в методиката, първоначално образците от изследваните материали бяха деформирани до достигане на разрушение (*фиг.6.17, фиг.6.18*). Това бе необходимо за определяне максималната височина на издуване на всеки материал. Тази информация послужи за определяне на стъпката, през която последователно бяха изпитвани образците при различна степен на деформация. Тази стъпка беше приета да бъде *5 mm* за всички размери на образците.

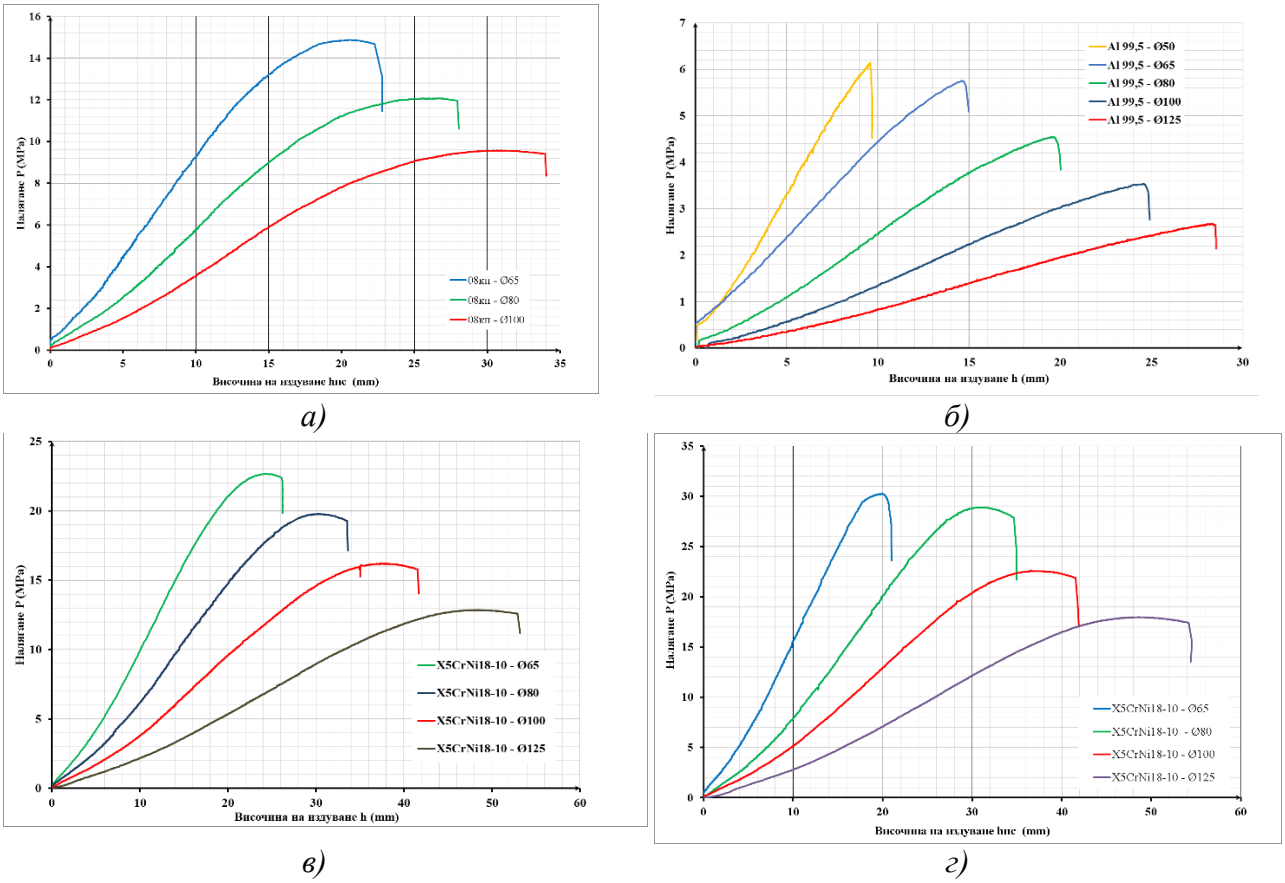


Фиг.6.17 Хидравлично изпитани проби до разрушение за листов материал 08кп а) Ø65 mm, б) Ø80 mm, в) Ø100 mm,

Фиг.6.18 Хидравлично изпитани проби до разрушение на листов материал X5CrNi18-10; t_0=0,6mm - Ø65 mm, Ø80 mm и Ø100 mm

Достиганите височини на издуване за стоманите при различните матрици бяха в следните граници: *35÷38 mm* за *Ø100 mm*, *28÷30 mm* за *Ø80 mm* и *23÷24 mm* за *Ø65 mm*. При това определен интерес представляваше и да се установи разположението на пукнатината от разрушение спрямо посоката на валцоване. При листовия материал *08кп* разпространението на пукнатината при разрушение протича по посоката на валцоване (*фиг.6.17)* (с точки върху фланците на пробите е означена посоката на валцоване). При листовия материал *X5CrNi18-10* разпространението на пукнатината при разрушение е перпендикулярно спрямо посоката на валцоване (*фиг.6.18*) (с точки и стрелка върху фланците на пробите е означена посоката на валцоване).

Достигнатите височини за алуминия при разрушение в основата на образците бяха в съответните граници - за Ø50 mm - 8÷10 mm , Ø65 mm - 13÷15 mm, Ø80 mm – 19,5÷21 mm, Ø100 mm - 23,5÷35 mm и Ø125 mm – 27÷28,5 mm Индикаторните диаграми от двумерен опън на алуминия са показани на *фиг.6.19б*.



Фиг. 6.19 Индикаторни диаграми от хидравлично издуване на: а) 08кп, t_0=0,8 mm; б) Al 99,5 t_0=1,5 mm.; в) X5CrNi18-10, t_0=0,6 mm; г) X5CrNi18-10, t_0=0,8 mm

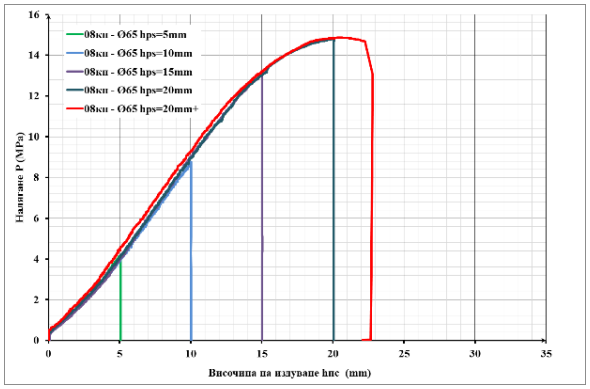
Получените криви при различните диаметри на матриците са с подобен характер, но се различават по необходимото налягане за настъпване на разрушение. Както можеше да се очаква, колкото по-малък е диаметърът на отвора на матрицата, толкова по-голямо налягане е необходимо за деформиране на изпитвания образец.

За проверка на разработения метод за хидравлично издуване се проведоха два вида експерименти със стомана *08кп* при използване на три вида матрици, респективно с три размера образци – *Ø65*, *Ø80* и *Ø100 mm*.

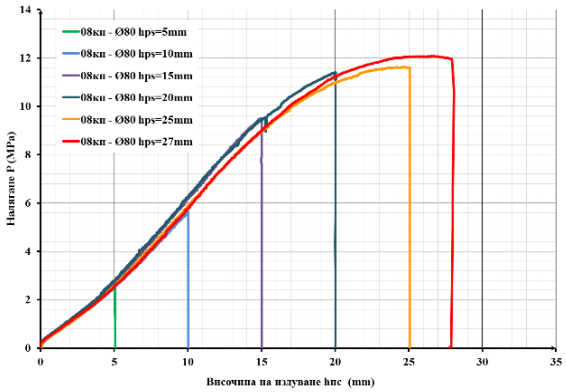
При първия експеримент за всяка степен на издуване е използван отделен образец. Всеки образец беше подложен на анализ за получаване необходимите данни. Броят на образците за построяване диаграмата на уякчаване на всеки материал е в зависимост от диаметъра на матрицата и достига при най-големите диаметри – *6* до *8бр*. Резултатите за всеки диаметър на матрицата са обобщени и представени на *фиг.6.20*.

Съвпадението на участъците от кривите, получени от отделните проби деформирани до определена степен е добра илюстрация за високата степен на

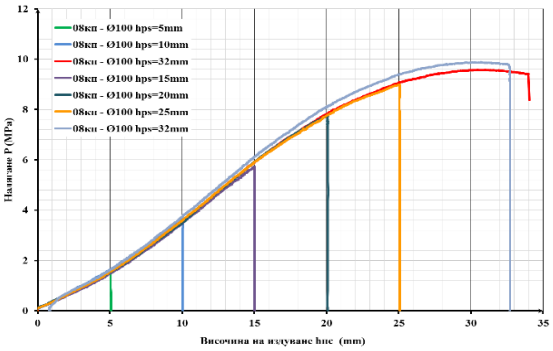
възпроизводимост на провежданите експерименти, което дава увереност, че разработеният метод е правилен и осигурява получаване на достоверни данни.



а)



б)



в)

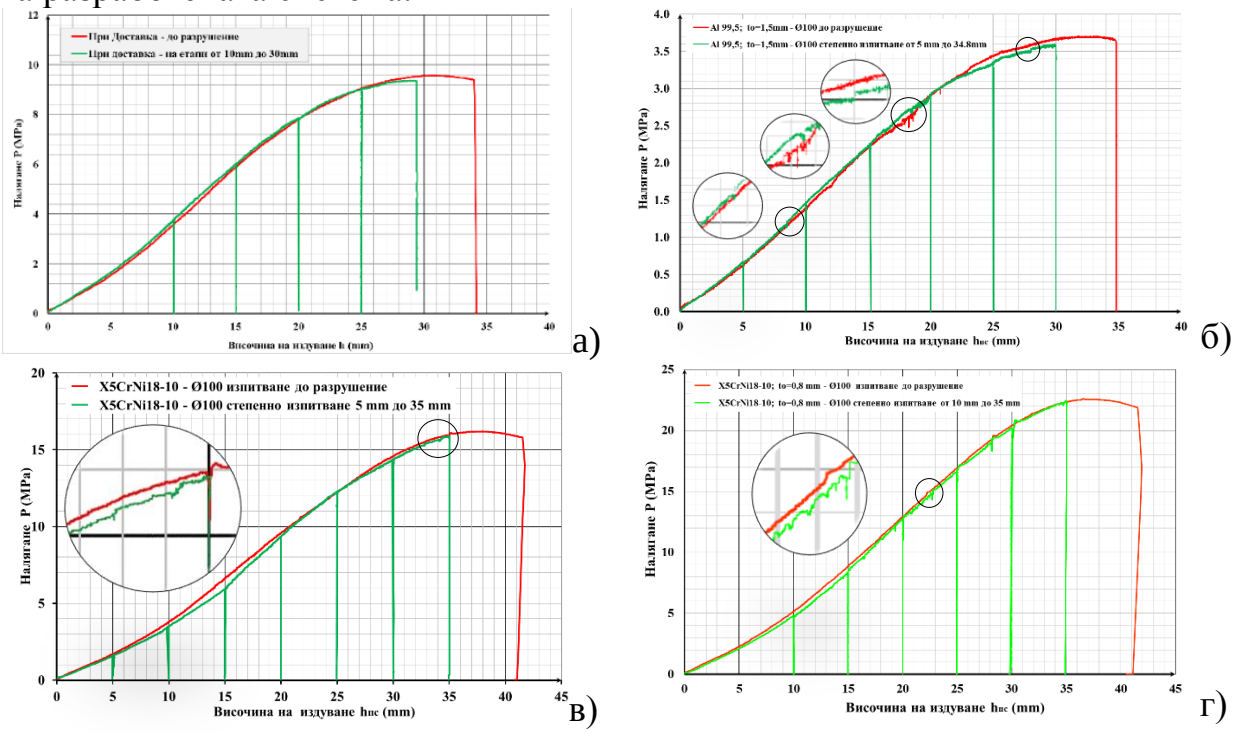
Фиг.6.20 Индикаторни диаграми на поредица деформирани образци с различна степен на издуване от 08кп при диаметър на матрицата: а) Ø65 mm; б) Ø80 mm и в) Ø100 mm

При тази серия експерименти за изследването на алуминия бе изработена матрица с радиус на закръгление в основата на деформиране *5 mm*. С помощта на изработената матрица бе избегнато разрушението в основата на образците, което се получаваше при матрицата с по-малък радиус на закръгление *3 mm*. В този случай достиганите максимални стойности на височината на издуване и на налягането при диаметър на матрицата *100 mm* се повишиха съответно до $h_{пс}$ = 35 mm и P = 3,7 MPa (фиг. 6.21б – кривата до разрушение в червен цвят).

Вторият експеримент имаше за цел да се провери възможността за рационализиране метода на изследване т.е. за получаване на една диаграма да се използва един образец вместо серия от образци. В такъв случай след началното деформиране до зададена степен образецът се снема от инструмента, подлага се на анализ за получаване на необходимите данни и се връща на позицията за следващата степен на издуване. Процедурата се повтаря до достигане на предварително определената максимална степен на деформиране на материала.

Получените индикаторни криви на деформиране за трите материала са показани на *фиг.6.21*. От тях се вижда, че приложеното последователно степенно деформиране на образеца не води до забележими промени на характера на получаваните криви. За сравнение върху диаграмите са нанесени и резултатите от първия експеримент. Както се вижда за стоманите кривите от двата

експеримента практически съвпадат. Прави впечатление при по-високите степени на издуване появата на назъбеност по диаграмата (ефект на Portevin-Le Chatelier – PLC) и при двата метода на изпитване. Ефектът PLC, който е проява на процеса на динамично деформационно стареене, по-силно е проявен при степенното изпитване на аустенитната стомана с дебелина 0,8 mm. За поввата на назъбеност допълнително влияе и аустенитно-мартензитното превръщане, протичащо в процеса на деформиране. Както при аустенитната стомана така и при алуминия беше регистриран PLC ефектът, който се проявява, макар и слабо, в различна степен през целия период на деформиране. Резултатите от проведения експеримент показват, че диаграмата на деформиране на даден материал, може успешно да бъде построена само с помощта на един образец от него. Експерименталното регистриране на PLC ефекта при хидравличното издуване на алуминия може да се разглежда като доказателство за високата чувствителност на разработената система.



Фиг.6.21 Индикаторни диаграми на степенно деформирани образци при диаметър на матрицата Ø100 mm а) 08кп; б) Al 99,5; в) X5CrNi18-10,t_0=0.6 mm; г) X5CrNi18-10,t_0= 0.8 mm

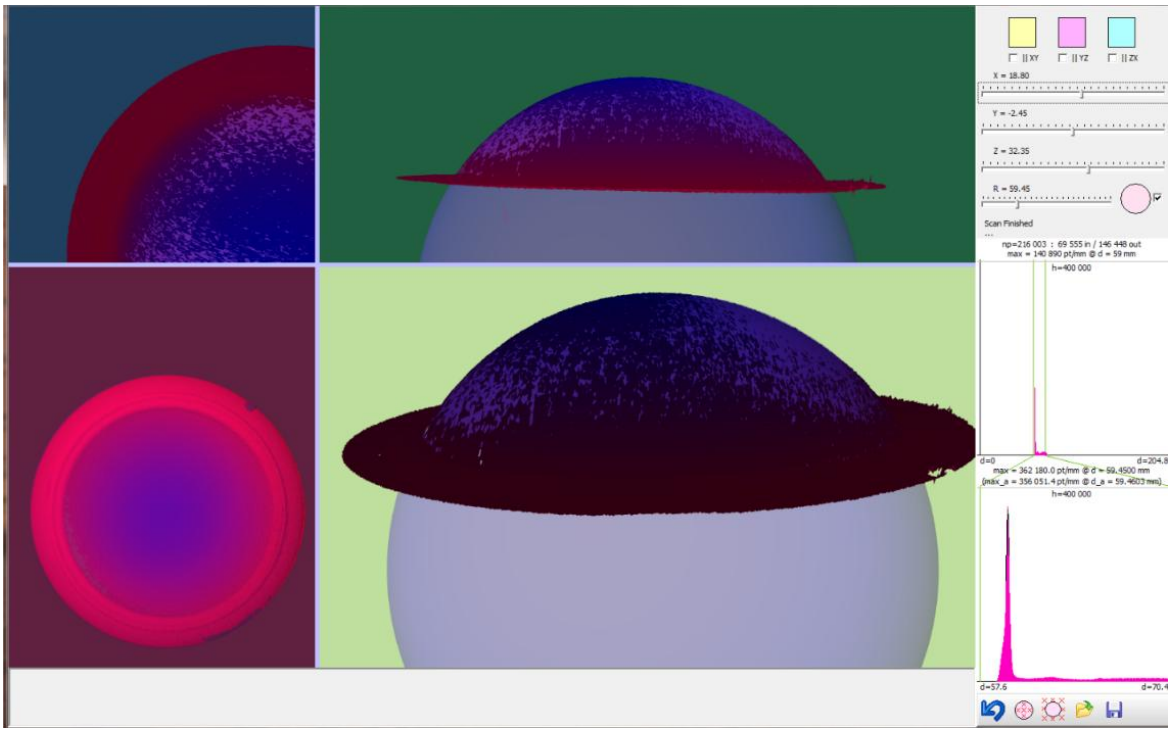
Компютърен анализ на деформираните образци

На всички деформирани проби се провеждаше компютърен анализ за определяне геометричната форма на деформираната след издуване повърхност. Анализът се осъществява с помощта на виртуален сферичен шаблон. Чрез налагане на шаблона върху дигиталния образ се следи за отклонението на повърхността на сканирания образ от сферичната форма (*фиг.6.22*). От изображението, което се вижда на екрана лесно може да се направи заключение без да се допусне особена грешка дали повърхността е сферична. Такава оценка може да служи само за предварителна информация. В процеса на анализ повърхността на сканираната проба се обхожда в продължение на известно време при автоматичен режим за получаването на количествена оценка. През този период непрекъснато се извеждат на монитора текущи данни за общия брой

възли, намиращи се под повърхността, над нея и за броя възли лежащи на повърхността. В случай на сферичност разпределението на възлите, което се визуализира, оформя тясна област с висока концентрация, отговаряща на радиуса на сферата заедно с неговите отклонения. Сферичността се определя с висока доверителна вероятност благодарение на статистическата обработка на голяма концентрация изследвани точки от повърхността на образеца. Така например в площ с диаметър *10 mm* около полюса обработката на *9800* точки дава сферичност с доверителна вероятност надвишаваща *0,99*. По подразбиране разработеният софтуер е предвиден да извежда стойностите на радиуса на външната повърхност. За изчисляването на радиуса на средната повърхност по дебелина, се провежда анализ и на вътрешната повърхност на образеца.

При всички изследвани материали и диаметри на матрици беше установено, че зоната непосредствено около полюса е сферична.

За определяне дебелината в полюса на образците се провежда измерване, като се използва разрез на дигиталния образ на образеца и стандартен CAD продукт.

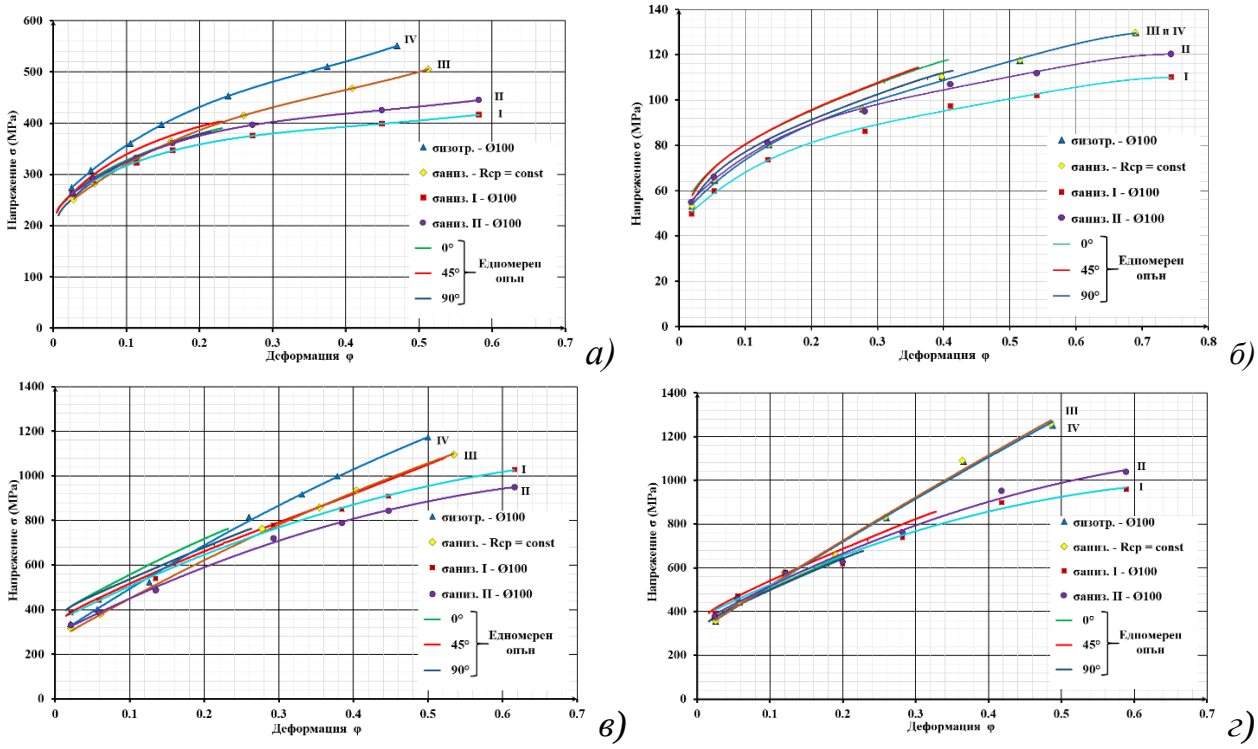


Фиг.6.22 Проверка за сферичност

Криви на уякчаване по данни от полюса

На базата на експериментално определените: налягане P, радиус на полусферата R_{cp}, дебелина в полюса t и с помощта на уравнение (3.10) са построени кривите на уякчаване на изследваните материали. На фиг.6.32 са представени заедно с кривите от двумерен опън и получените криви на уякчаване от едномерен опън. Кривата IV за всеки материал от двумерен опън отговаря на предпоставката за изотропност и като правило не се явява продължение на съответната крива от едномерен опън. В настоящия труд бе предположено, че кривата от двумерен опън може да се яви като продължение от едномерен опън, ако се приложи корекция за анизотропност чрез променящи се коефициенти на анизотропия.. Крива I е построена като се използва корекция с двата частни

коефициента на равнинна анизотропия чрез уравненията на измененията им във функция от степента на деформация. Крива II е построена със средния коефициент на нормална анизотропия чрез уравненията на измененията му във функция от степента на деформация на материала. За сравнение е построена крива III с постоянен коефициент на нормална анизотропия при степен на деформация *20%*. Най-добри резултати, както се вижда от фиг.6.23, осигурява корекцията с променлив коефициент на средна нормална анизотропия. Следва да се отбележи, че при различните материали тази корекция няма еднакъв ефект, а при аустенитната стомана с различни дебелини дава чувствителни отклонения.



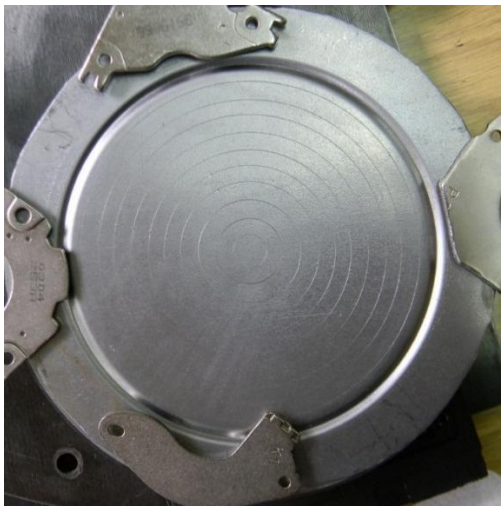
Фиг.6.23 Диаграми на уякчаване на листови материали от едномерен и двумерен опън с отчитане анизотропията при диаметър на матрица Ø100 mm а) 08кп; б) Al 99,5; в) X5CrNi18-10,t_0=0.6 mm; г) X5CrNi18-10,t_0= 0.8 mm

Деформирано и напрегнато състояние извън полюса

В теоретичния анализ бе показана една възможност за определяне на напреженията и деформациите в произволна точка от повърхността на образеца извън полюса. Компютърният анализ на сканиран деформиран образец може директно да даде данни за дебелината и оттам да се изчисли деформацията по дебелина φ_t . Меридианната деформация φ_ϕ може да се определи индиректно от φ_t и от предварително определена кръгова деформация φ_θ:

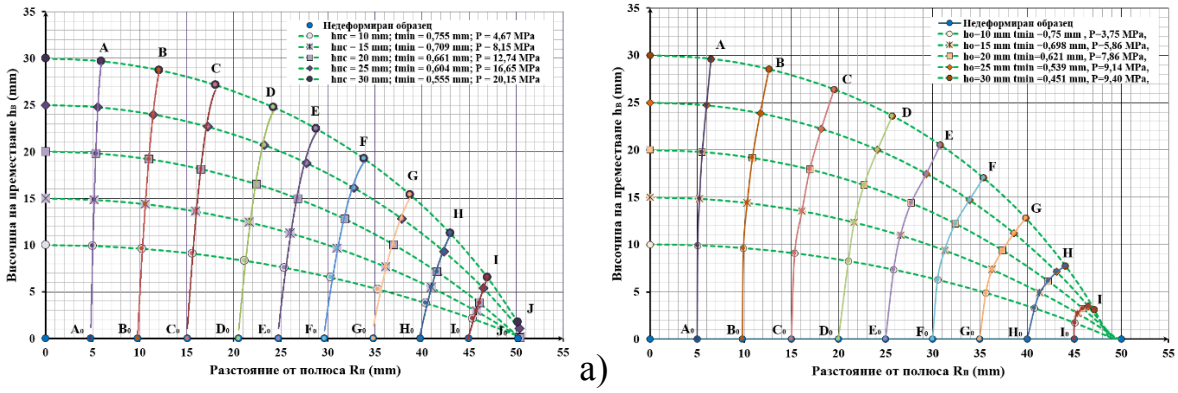
$$\varphi_\phi = -(\varphi_\theta + \varphi_t) \qquad (6.1)$$

За определяне на кръговата деформация е използването на мрежа от концентрични окръжности със стъпка 5 mm на радиус (Фиг.6.24). За маркиране на точки, в които се определят трите вида деформации са разчертани два взаимно перпендикулярни диаметъра - по посока на валцоване и в напречно направление.



Фиг. 6.24 Образец с нанесена мрежа от концентрични окръжности

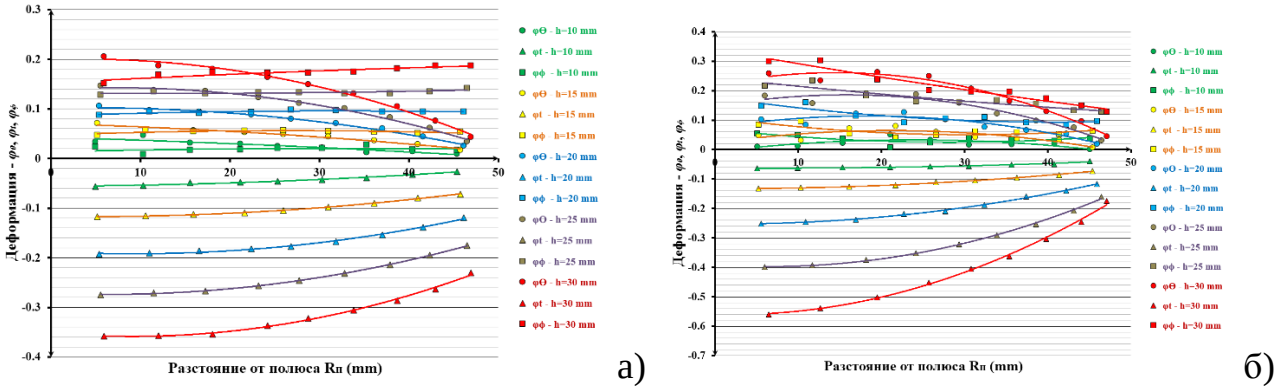
На *фиг.6.25* са показани експериментално определените траектории на движение на маркираните точки в зависимост от степента на издуване на образци от стомани *X5CrNi18-10* с дебелина *0,8 mm* и *08 кп 0,8 mm*.



Фиг. 6.25. Траектории на движение на точки а) X5CrNi18-10 с дебелина t_0=0,8 mm; б) 08кп при диаметър на матрицата Ø100 mm

От фигурата се вижда, че движението на точките не е по общ закон. Точките в близост до полюса се преместват по траектории близки до права линия. С отдалечаване на точките от полюса траекториите им се превръщат в криви с постепенно намаляващ радиус на кривина. При това се забелязва, че точките в близост до полюса по-слабо се отклоняват при нарастване степента на деформация, отколкото точките, разположени на по-голямо разстояние от полюса.

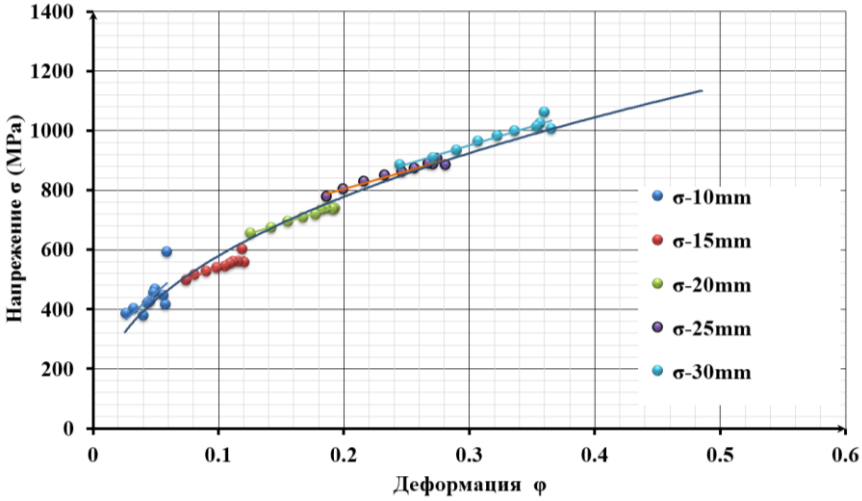
От получените резултати за преместванията на точките в радиално направление спрямо полюса за всяка точка от повърхността са изчислени кръговата деформация φ_θ, а от изменението на дебелината е пресметната деформацията по дебелина φ_t. Определянето на меридианната деформация φ_ϕ се осъществява с помощта на уравнението за запазване на обема. Построените графични зависимости за техните изменения в зависимост от степента на издуване на стомани *X5CrNi18-10* с дебелина *0,8 mm* и *08 кп* с 0,8 mm са показани на *фиг.6.26*.



Фиг. 6.26. Изменение на деформациите извън полюса а) X5CrNi18-10 с дебелина t_0=0,8 б) 08кп mm при образец Ø100 mm

Така определените траектории на преместване на точки от деформирания купол принципно могат да се използват за проверка и обосновка на известните теоретични модели на процеса хидравлично издуване.

На базата на експериментално определените стойности на деформациите φ_t, φ_θ и φ_ϕ за точки извън полюса могат да бъдат пресметнати стойностите на еквивалентните напрежения за тези точки. Това всъщност означава, че е възможно да бъдат построени експериментални криви на уякчаване при изпитване на двумерен опън чрез хидравлично издуване по данни от точки извън полюса.



Фиг. 6.27. Крива на уякчаване по точки извън полюса за стомана X5CrNi18-10 с дебелина 0,8 mm при 5 степени на издуване

Като пример за опитна зависимост между еквивалентните напрежения и деформации по данни за точки извън полюса на фиг. 6.27 са представени резултати за стомана X5CrNi18-10 с дебелина 0,8 mm. Вижда се, че експерименталните точки от всяка степен на издуване, въпреки наличието на известно разсейване, логично следват очакваната тенденция на нарастване и като обща съвкупност добре се групират около една обща зависимост. За сравнение е показана (с плътна линия) и опитната крива на уякчаване за същия материал, получена по-горе само по данни за полюса. Тези резултати засега имат предварителен характер и се отнасят само за данни без отчитане на

анизотропията, но очевидно съществуват основания за бъдещи разширени изследвания в тази насока.

ИЗВОДИ ОТ ГЛАВА 6

1. Установено е чрез степенно изпитване на едномерен опън до загубата на устойчивост за изследваните материали, че коефициентите на равнинната анизотропия не са константи и, като правило, стойностите им нарастват по линеен закон с повишаването на степента на деформация.
2. Установено е, че разработеният метод за тримерен геометричен анализ на купола на изпитваните образци чрез лазерно сканиране и следващо статистическо обработване на данните осигурява получаването на достоверни резултати за формата и размерите на купола.
3. Доказано е за изследваните материали, че формата на образците след хидравлично издуване е сферична в по-голямата част от деформираната повърхност с изключение на зоната около периферията.
4. Доказано е, че използването на обичайния начин за отчитане нормалната анизотропия до степени на деформация *20%* от едномерен опън, дава слабо изменение на опитната изотропна крива на уякчаване, което води до нереално завишени стойности на напреженията.
5. За построяването на обобщена крива на уякчаване, без разминаване на резултатите от едномерен и двумерен опън е необходимо да се отчита влиянието на анизотропията в зависимост от деформацията, така и да се използват достоверни аналитични формули или опитни данни за формата и размерите на изпитваните образци.
6. Предложена е нова възможност за експериментално построяване на кривите на уякчаване при изпитване на хидравлично издуване чрез определяне на еквивалентните напрежения и деформации в допълнителни точки извън полюса на деформираните образци.
7. Необходими са по-подробни допълнителни изследвания за променящата се анизотропия в листовите метали в зависимост от степента на деформация и за метода за определяне напреженията и деформациите извън полюса.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработването и окончателното оформяне на настоящата дисертация се основава на формулираните в глава 2 цел и основни задачи на изследването. Използван е комбиниран подход, който включва: проектиране, реализиране и тестване на система от компютъризирани модули за деформиране посредством хидравлично издуване (модул 1) и за тримерен геометричен анализ на пробите (модул 2); разработване на методики за изпитване на двуосен опън, съобразени с разработените модули и с изискването за получаване на достоверни опитни резултати; провеждане на експериментални изследвания върху разпространени в индустриалната практика листови метални материали; обработване и анализ на опитните данни с особено внимание към известните литературни сведения и към използваните методики и средства за изследване. От представените тук методики

и резултати могат да бъдат изведени редица приноси за науката и практиката, които са формулирани по-долу в този раздел.

Научни приноси

1. Създадени са компютъризирана уредба (глава 4) и оригинална методика (глава 5) за автоматизиран тримерен анализ на формата на изпитваните проби чрез лазерно сканиране и софтуерно статистическо обработване на опитните данни, които осигуряват висока точност (над 0,01 mm) и достоверност на резултатите (над 99% доверителна вероятност).

2. Установено е (глава 6), че формата на купола на деформираните чрез хидравлично издуване проби от изследваните листови материали е сфера (с изключение на прехода от купола към периферията) за широк диапазон от диаметри на матрицата (Ø40÷130 mm) и височини на издуване (5÷35 mm) и независимо от анизотропията на изпитваните проби.

Научно-приложни приноси

1. Установено е (глава 6), че за изпитваните материали (стомани 08кп и X5CrNi18-10 и алуминий Al99,5) коефициентите на нормална и равнинна анизотропия зависят от степента на деформация при едномерен опън, като според получените опитни резултати се изменят по линеен закон.

2. Създадена е компютъризирана уредба за изпитване чрез хидравлично издуване на листови материали (глава 4) в диапазона 25÷250 (отношение на диаметъра на матрицата към дебелината на материала) с отчитане, визуално наблюдаване и архивиране на опитните данни в реално време.

3. Създадени са собствени софтуерни продукти (глава 4) за управление и контрол на уредбите за деформиране и сканиране и за анализ на опитните резултати, с което отстраняват възможни субективни грешки и улесняват работата на изследователя.

4. Предложена е собствен методика за опитно построяване на кривите на уякчаване по данни от хидравличното издуване и от анализа на виртуалния образ на деформирания купол с отчитане на променливите коефициенти на анизотропия.

5. Получени са предварителни резултати за траекториите на точки извън полюса на деформирания купол, които могат да се използват за проверка на теоретичните модели на процеса хидравлично издуване.

6. Предложена е нова възможност за експериментално построяване на кривите на уякчаване на листови метали по данни за деформациите на точки извън полюса на деформираната проба.

Приложни приноси

1. Построени са експериментални криви на деформационно уякчаване при едномерен и двумерен опън за изпитваните метали по създадената собствена методика, които могат да се използват за технологично проектиране или при компютърно симулиране на листови деформационни процеси.

2. Създадените методики, уредби и софтуерни продукти могат да бъдат използвани за изпитване на различни други листови материали, за обучение на студенти в бакалавърска и магистърска степен и за научно обслужване на заинтересовани производствени фирми

ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИЯТА

1. **Янков Е**., „Аналитично определяне на напреженията и деформациите при хидравлично формоване”, Национална студентска научно-техническа конференция ‘06, София, 2006, стр. 225÷230, ISBN 10: 954-438-574-6.
2. **Янков Е**., А. Иванов, В. Гагов, „Тримерен деформационен анализ на процеса хидравлично издуване”, Машиностроене и машинознание, брой 11, Варна, Година V, Книга 2, 2010, стр. 72÷75, ISSN 1312-8612.
3. Tomov B., V. Gagov, **E. Yankov**, R. Radev, „Research highligths of sheet metal testing by hydraulic bulging”, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2011, No 46, pp. 65÷70, ISSN 1734-8412.
4. **Янков Е**., В. Гагов, Р. Радев, Д. Господинов, „Уредба за изпитване на листови метални материали чрез хидравлично издуване”, Машиностроене и машинознание, брой 17, Варна, Година VII, Книга 3, 2012, стр. 10÷13, ISSN 1312-8612.
5. Гагов В., **Е. Янков**, Д. Господинов, Р. Радев, „Експериментално изследване на анизотропията на листови метални материали”. Машиностроене и машинознание, брой 18, Варна, Година VIII, Книга 1, 2013, стр. 42÷45, ISSN 1312-8612.

SHEET MATERIALS TESTING USING BIAXIAL HYDRAULIC BULGE TEST

Emil Yankov

Anotation

This doctoral thesis is about development of a method and computer system for researching of sheet materials by hydraulic bulging. The method consist in using computer analysis of 3D image of laser scanned sample. This approach gives opportunity for experimental defining of sphericity in the pole zone and high accuracy measuring of radius and thickness. With the developed methodology, it is possible to carry out a total surface stress and strain analysis of the sheet sample. The system is used to conduct investigations of a mild steel sheet: „08кп” (EN 1.0330) with thickness t_0=0.8mm; austenitic steel sheet „X5CrNi18-10” (EN 1.4301) with thicknesses t_0=0.6mm and t_0=0.8mm and aluminum „Al 99.5” (EN AW-1050A) with thickness t_0=1.5mm. With the combine using of developed system and uniaxial tensile machine are obtained results corrected for anisotropy which served as basis for determination the correlation functions „equivalent stress - equivalent strain” up to deformation degree of 0.7. The research proves substantial anisotropy influence over strengthening curves which is due to the growth of anisotropy coefficients with increasing of deformation degree.