

**Резюмета на основните резултати и научни приноси
на гл.ас. д-р инж. Светла Русанова Янкова
за участие в конкурс за академична длъжност „Доцент”**

Постигнатите основни резултати и приноси в научно-изследователската ми работа могат да се групират в следните тематични направления:

I. Изследване на съвременни технологични процеси в преработвателната черна и цветна металургия с оглед на тяхното усъвършенстване

I-1. Изследване на валцуването на стомани и усъвършенстване на технологията. Анализиране на качеството и устойчивостта на технологичния процес въз основа на определените механични характеристики на крайния продукт.

I-2. Изследване на валцуването на цветни метали и сплави. Анализиране на качеството и устойчивостта на технологичния процес въз основа на определените физико-механични характеристики на крайния продукт.

I-3. Провеждане на демонстрационни и изследователски лабораторни практикуми по:

- сплескване на метали и сплави като основа на технологичните процеси на на технологиите на коване, валцуване, шампуване, пресуване;
- валцуване на лабораторен стан на черни и цветни метали и сплави в различни термо-деформационни условия;
- изправяне на валцувани дълги продукти на лабораторен стан чрез прилагане на едномерен опън.

I-4. Усъвършенстване на лабораторна технология за пластична деформация на метални материали, използвана при получаване на високотемпературни свръхпроводими сплави.

I-5. Получаване и изследване на материали и сплави с повишени съпротивителни показатели и ограничени деформационни възможности.

II. Изследване на умората в различни валцувани стомани

II-1. Изследване на уморния процес в различни класове конструкционни стомани.

II-2. Изследване на уморния процес в стомани, използващи се във водородните технологии и по-специално в резервоари и съдове, преносни системи и съоръжения за транспортиране или практическо използване на водород под високи налягания.

III. Изследване на метални материали със специално предназначение

III-1. Изследване на механичните показатели на метални аморфни сплави и специфичните им характеристики: термичната устойчивост, вискозитет, стъклообразуваща способност.

III-2. Изследване на механичните показатели на ортодонтични дъги в реални условия.

I. Изследване на съвременни технологични процеси в преработвателната черна и цветна металургия с оглед на тяхното усъвършенстване

Интересът на изследователите и инженерите към изучаване на теорията и процесите за пластична деформация на металите доведе до непрекъснато развитие и усъвършенстване на технологиите за получаване на различни метални изделия чрез пластично деформиране, създаване на нови агрегати, цехове и заводи, разработване, внедряване и автоматизиране на нови технологични линии и агрегати, както и до търсене на възможности за икономия на енергия и метали.

Прогресивните направления, като съчетаването на леенето с валцуването и съчетаването на деформацията с термичното обработване, през последните години, позволиха да се икономисат 20-35 % метал и 10-50 % енергия.

Процесите и промишлените предприятия за обработване на металите чрез пластична деформация са едни от основните за световната индустрия и икономика. Ролята на пластичната деформация на металите непрекъснато нараства. Обработването на металите чрез пластична деформация е процес, както за промяна на формата и размерите на металната заготовка за получаване на краен продукт, така е и ефективен метод за промяна на неговите свойства.

Развитието на теорията на пластичната деформация на металите позволява създаването и оптимизирането на нови технологични процеси, което едновременно с въвеждането на автоматизираното им управление, води до подобряване на качествените показатели на изделията, получени чрез пластична деформация по физико-механични свойства, геометрични размери и състояние на повърхността.

Съвременните металургия и машиностроене се характеризират не само с нарастване на обема и обогатяване на асортимента на продукцията, но и с рязко подобряване на показателите на нейното качество. Към металните продукти се предявяват все по-високи изисквания към качеството им, което е предпоставка за увеличаване на експлоатационния им срок, надеждността на конструкциите, машините и механизмите. Висококачественото изделие се отличава с постоянен химически състав, микро- и макроструктура, геометрична форма и размери и гарантирани физични и механични свойства. Качеството на металите зависи преди всичко от техните механични свойства, определящи поведението им в процеса на обработване и експлоатация; механичните свойства на металите са пряко свързани с тяхната структура. Контролирането на настъпващите в метала изменения на всички стадии от неговото получаване, обработване и използване е изключително важно, както и установяването на налични дефекти в структурата му.

I-1. Изследване на валцуването на стомани и усъвършенстване на технологията. Анализирание на качеството и устойчивостта на технологичния процес въз основа на определените механични характеристики на крайния продукт.

(A1) Angelova D., R. Yordanova, A. Georgiev, S. Yankova, On monitoring of mechanical characteristics of hot rolled S355J2 steel, *Frattura ed Integrità Strutturale* 10 (37), pp. 265-271, 2016

(B15) Йорданова Р.М., Георгиев А.Пл., Янкова Св.Р., Ангелова Д.Г., Подоброено качество на горещовалцуван лист от стомана S355J2 чрез промяна в технологичния процес, *Научни известия на НТСМ*, година XXII, брой 1(150), юни 2014, стр. 122-125

(B21) Р. Йорданова, Д. Ангелова, А. Георгиев, С. Янкова, Изследване на възможностите за подобряване на механичните показатели на нисковъглеродна горещовалцувана стомана, *Научни известия на НТСМ*, година XXI, брой 2(139), 2013, 249-253

В публикации (A1), (B15) и (B21) са представени резултати от изследванията, проведени в реална производствена среда, а именно върху технологичният процес на получаване чрез горещо валцуване на плосък продукт от нисковъглеродна, нисколегирана конструкционна стомана S355J2+N с цел подобряване на механичните показатели на крайния продукт. Химичният състав, механичните и технологичните свойства на горещо валцувания лист от изследваната стомана, както и състоянието на повърхността, вътрешните дефекти и геометрията са регламентирани от стандарт EN 10025-2:2004 „Горещовалцувани продукти от конструкционна стомана”.

1. Разработени са и са реализирани два температурно-скоростно-деформационни технологични режима на нормализационно горещо валцуване – режим А и режим В, при които процесът на нормализация се осъществява едновременно с процеса на деформация. Режимите са разработени съответно за получаването на два профилоразмера – лист с дебелина с дебелина 30 mm и 40 mm.

Режим А. Процесът на валцуване се осъществява при настройване на параметрите на валцовия агрегат, осигурявайки големи сили на валцуване (до 75% от максималното за агрегата или до 16000 kN); голям въртящ момент (работи се над номиналните за агрегата стойности); голяма разлика между началната и крайната дебелина на метала за съответния проход, ΔH [mm], съответно голяма степен на деформация (редукция) в проходите – до 20%. Температурно-скоростно-деформационният на нормализационно валцуване е разработен с 21 прохода, като процесът в първите два прохода се осъществява с ниска степен на деформация, след което следва кантуване на металния блок. В следващите проходи деформационният процес се провежда с голямо ΔH (до 20 mm) до достигане на междинна дебелина, следва престой, през което време температурата на метала достига необходимата температура за протичане на процеса на нормализация. Деформационният процес продължава в последните проходи с малка степен на деформация, достигайки съответната дебелина на готовия продукт.

Режим В. Процесът на валцуване се осъществява при настройване на параметрите на валцовия агрегат, осигурявайки по-малко усилие (до 68%), по-нисък въртящ момент, по-малки стойности на $H \Delta$ в проходите (между 13 и 16 mm), съответно степента на деформация намалява до 16-20% максимум. Всичко това води до увеличаване на броя на проходите. При тези начални условия, чрез използване на оптимизационна програма е разработен температурно - деформационен режим, състоящ се от 25 прохода, като режимът на валцуване в първите четири прохода до кантуване на метала се осъществява с големи $H \Delta$, което води до големи деформации на метала. Температурата на метала е достатъчно висока, за да осигури добра пластичност, в резултат на което металът се деформира без претоварване на агрегата. Процесът на валцуване продължава аналогично на този при режим А.

Въз основа на изследване и анализиране на промените по проходи на дебелината на валцувания метал, относителната деформация, силата на валцуване и температурата за двата режима е установено, че нормализационното валцуване по режим В, осигурява получаването на качествен продукт с желани свойства, отговарящи на стандарт EN 10025-2:2004 (Резултатите се потвърждават при валцуването на лист с дебелина 30 и 40 mm.), тъй като:

- Валцуването с големи степени на деформации в началните проходи спомага за премахване на голяма част от дефектите в слябите, както и за изтласкването им към страничните повърхности на валцувания метал;
- при кантуване, страничните повърхности, носители на голяма част от останалите структурни дефекти, попадат в предния и задния край на валцувания метал, които след приключване на деформацията се отстраняват, чрез изрязване на краищата на лентата.
- След кантуването, ΔH плавно намалява, като в последните проходи се валцува с малко ΔH , с което се цели получаването на лист с точен краен размер (дебелина) и правилна геометрия.

- Използването на комбинираната технология валцуване с нормализация позволява да се използва температурата на метала, в резултат на което се премахва необходимостта от последващо термично обработване на готовото изделие, спестявайки енергия и разходи по допълнителни производствени мощности;
- Чрез режим В се постига контролиране на температурата на метала в края на валцуването, което е предпоставка за получаване на механични свойства, регламентирани от стандарт EN10025 – 2:2004, според който температурата на край на валцуването трябва да варира в интервала 850 – 865°C.

2. Образци от получените валцувани листа с две различни дебелини по двата режима А и В (общо 40 броя) са изследвани за определяне на тяхната структура и свойства.

- Установено е, че стоманата е с ферито-перлитна структура.

- Анализът на резултатите от механичните изпитвания за определяне на якост на опън, условна граница на провлачане, удължение и енергия на удара показва, че в резултат на валцуване по *режим А* изброените показатели на крайния продукт се понижават, което се дължи основно на малкия брой проходи на валцуване с големи деформации в проходите, на малките ΔH в първите два прохода, когато металът е с максимална пластичност, както и на понижените възможности за контролиране на температурата на метала след прокључване на процеса на валцуване. При валцуване по *режим В* показатели на крайния продукт са по-добри, без големи отклонения от средната стойност и отговарят на стандарта.

- Резултатите са сравнени с изискванията на стандарта EN 10025-2:2004 „Горещовалцувани продукти от конструкционна стомана“, като те потвърждават, че разработеният режим В е по-подходящ за валцуване на лист от изследваната стомана, което от своя страна гарантира повтаряемост и стабилност на процеса, а от там и качеството на готовите изделия.

3. В публикации (A1) и (B21) са представени по оригинален начин резултатите от направените изследвания за определяне на механичните показатели на готовите изделия, получени при валцуване по режим В до две крайни дебелини на листа - 30 и 40 mm. Въз основа на получените механични характеристики на валцуваните листа (граница на провлачане, якост на опън, абсорбираната енергия от изпитвания на удар), както и на удължението след разрушаване са построени два вида пространства “енергийно-силови” и “енергия–напрежение–удължение”. Тези пространства могат да бъдат използвани за обща оценка на прилаганата технология на валцуване и за предсказване на механично поведение на крайния продукт – стоманен лист.

(A5) Sergey M. Belskiy, Svetla Yankova, Vyacheslav B. Chuprov, K.V. Bakhaev, Aleksandr O. Stoyakin, Temperature field of stripes under hot rolling, *Journal of Chemical Technology and Metallurgy* (ISSN: 1314-7471), 50 (6), 2015, pp. 613-616

В Липецкият металургичен комбинат е проведен технологичен експеримент, в резултат на което е установено, че разпределението на температурното поле по ширина на лентата обяснява нейната разноедебелинност и клиновидно напречно сечение.

Предложени са адекватни мерки за намаляване на разноедебелинността на лентата чрез непрекъснато следене на разпределението на температурното поле и непрекъснато поддържане на необходимата температура. По този начин се създава база за автоматизиране на процеса.

I-2. Изследване на валцуването на цветни метали и сплави. Анализиране на качеството и устойчивостта на технологичния процес въз основа на определените физико-механични характеристики на крайния продукт.

(B9) Йорданова Р., Св. Янкова, Г. Атанасова, Изследване на влиянието на химичния състав върху електропроводимостта и механичните свойства на високо електропроводима мед, *Научни известия на НТСМ* (ISSN 1310-3946), година XXIII, брой 1(164), февруари 2015

(B10) Атанасова Г. Б., Св. Р. Янкова, Р. М. Йорданова, Д. Г. Ангелова, Изследване на механичните характеристики на електролитна мед в твърдо, полутвърдо и меко състояние, *Научни известия на НТСМ* (ISSN 1310-3946), Година XXIII, бр. 2(165), юни 2015, стр. 222-225

(A7) Donka Angelova, Svetla Yankova, Rozina Yordanova, Gergana Atanasova, On monitoring mechanical characteristics of rolled electrolytic copper, *ELSEVIER, Procedia Structural Integrity*, Volume 2, pp. 2315-2322, 2016

(B14) Янкова С.Р, Йорданова Р.М., Ангелова Д.Г., Павлова Р.З., Атанасова Г.Б., Изследване на качеството на медни продукти, *Научни известия на НТСМ*, година XXII, брой 1(150), юни 2014, стр. 126-129, 2014

(B19) Г. Атанасова, С. Янкова, Р. Йорданова, Д. Ангелова, Изследване на механичните показатели на лента от ZnCuTi сплав при два режима на валцуване, *Научни известия на НТСМ*, година XXI, брой 2(139), 2013, 254-257

(B22) Атанасова Г.Б., С.Р. Янкова, Р.М. Йорданова, Изследване на влиянието на легиращите елементи (Cu, Ti, Al) върху структурата на ZnCuTi сплав, *Научни известия на НТС по Машиностроене*, година XX, бр. 1 (133), 2012, стр. 78-80, 2012

Медта е единственият материал, който притежава много ценна комбинация от висока електропроводимост, якост, еластичност, в съчетание с добра корозионна устойчивост, устойчивост на пълзене и умора. Освен високата си електропроводимост, медта притежава изключителна пластичност. Тези свойства на медта я правят предпочитана за много приложения, най-често в електрониката, поради добрата ѝ електропроводимост. Високата електро- и топлопроводимост, добрата способност към формоизменение чрез различни методи на пластична деформация, пластичност, якост, корозионна устойчивост и привлекателен външен вид са част от достоинствата които определят широкото приложение на медта и нейните сплави, както в лято състояние, така и във вид на различни продукти, получени чрез пластична деформация.

В производството на материали, при които се изискват определени качества, влияят много фактори – от химическия състав на отлетия метал, режимите на леење, до режимите на гореща и студена деформация, режимите на термично обработване до получаването на желано изделие.

Основното приложение на **високо електропроводима мед (ЕТР)** е в електрониката, ето защо, от основно значение е полученото изделие да притежава отлична електропроводимост. Физичните свойства на материалите, в частност електропроводимостта се влияят от химичния им състав, а той оказва влияние и върху механичните свойства.

В публикация **(B9)** са представени резултати от изследванията върху влиянието на химичния състав (изследваните примеси в медта са кислород, цинк, фосфор и сребро) върху електропроводимостта и механичните свойства на високо електропроводима мед като е намерено оптималното съдържание на химични елементи в медта, при което се получава меден блок с добра обработваемост и желани свойства (електропроводимост, якост на опън, граница на провлачане, твърдост и удължение) на получения краен валцуван продукт.

Установено е, че при образците с високо съдържание на фосфор, се наблюдава най-ниска електропроводимост. Същото се наблюдава и при образците с високо съдържание на цинк. Поради високата концентрация на кислород (над 0,020%) се наблюдават ниски концентрации на фосфор и цинк, тъй като кислородът се свързва с тях под формата на ZnO и P₂O. Кислородът от своя страна не влияе върху електропроводимостта, но при концентрации над 0,025%, медта губи част от пластичността си и при огъване има вероятност от поява на пукнатини, които да доведат до разрушаване на материала. Получените резултати показват, че е необходимо стриктно контролиране в производствения процес на:

- концентрацията на кислорода в границите 0,0195 – 0,0250%, достатъчна, за да се редуцират вредните примеси; същевременно, концентрацията на кислорода не е толкова висока, че да влияе отрицателно върху механичните показатели

- концентрацията на цинк, така че да не надвишава 0,0009%, за да се предотврати редуцирането на кислорода с цел постигане на много добра електропроводимост и повишаване на механичните свойства;

- концентрацията на фосфор, така че да не надвишава 0,0009 %, тъй като фосфорът има най-неблагоприятно влияние върху електропроводимостта.

След отливането на изследваните 7 медни блока (сляби с дебелина 240 mm) и направения химичен анализ, блоковете са подложени на пластична деформация (валцуване) до получаването на плосък продукт с дебелина 0,70 mm. Блоковете са подложени на горещо и студено валцуване с последващо термично обработване – отгряване при температура 620°C за 1 час. Пробните тела, взети от получените плосковалцовани продукти са тествани, за да се установи тяхната якост на опън, пластичност и физични свойства (електропроводимост).

Установено е, че след горещо и студено валцуване до дебелина на лентата 0,7 mm и последващо отгряване само два блока отговарят на желаните физични и механични свойства. Блокове със състав 5 и 1 са с оптимален химичен състав, в резултат на което при прилагане на съответната технологична схема на валцуване и отгряване се получава продукт с много добра електропроводимост в съчетание с високи механични свойства.

Обект на изследване в публикации (A7) и (B10) е **високоелектропроводима мед**, получена чрез различни технологични схеми на валцуване и термично обработване в три състояния – твърдо, полутвърдо и меко. Изпитани са по осем пробни плоски образци от всяко едно състояние на материала.

1. Установена е микроструктурата на изследваните образци за трите състояния мед при различните състояния и е определена големината на зърната.

2. Определени са якостните показатели на получените изделия - якост на опън, условна граница на провлачане, пластичните им показатели – удължение и твърдостта им по Vickers. Установено е, че съпротивителните показатели - якостна опън, условна граница на провлачане и твърдост нарастват в реда: меко, полутвърдо и твърдо състояние, а пластичните показатели (удължението) намаляват.

3. Установена е промяна в електропроводимостта на валцуваните листове, получени в различно състояние. Установено е, че електропроводимостта се влошава с увеличаване на якостните показатели на изделието, съчетано с издребняване на металните зърна, т.е. валцуваните листове, получени в меко състояние (ниска якост, висока пластичност, голямо зърно) са с най-висока електропроводимост.

4. Представени са по нов, оригинален начин графични интерпретации на резултатите даващи връзката между структурата, механичните свойства и електропроводимостта. Построени са пространствата “**твърдост – напрежение**”. Тези пространства илюстрират връзката между технологията на валцуване и получените свойства на готовото изделие. Могат да се използват като инструмент за обща оценка на прилаганата технология за валцуване, както и за търсене контрол на устойчивостта на процеса.

В публикация (B14) са представени резултати от изследвания върху технологичния процес, структурата, свойствата и дефектите на рулони от три вида **месингова ламарина**

CuZn30, CuZn33 и CuZn37), получени в три състояния меко, твърдо и полутвърдо при валцуване.

В работата са изследвани три вида месингова ламарина - **CuZn30, CuZn33 и CuZn37**, получени чрез специфично термомеханично обработване с цел получаване на изделия в различно състояние - меко, твърдо и полутвърдо.

Получените в лелярно производство сляби от трите материала са подложени на задължителното при горещо валцуване преддеформационно нагряване, осъществено в тризонна, методична нагревателна пещ, осигурявайки температура на метала на изхода на пещта 850°C. В зависимост от това, в какво състояние трябва да се получи готовото изделие – меко, полутвърдо и твърдо, се извършва различно термомеханично обработване на метала:

- твърдо състояние - нагретият метал се валцува на горещо в реверсивен двувалцов стан “Дуо 850”, след което се подлага на студено валцуване на стан «Кварто 380»;
- меко състояние - така валцувания метал се подлага на термично обработване – отгряване в калпакови пещи или пещи за непрекъснато отгряване;
- полутвърдо състояние – след горещото валцуване, следва студено валцуване до междинна дебелина, след което металът се подлага на отгряване и последващо студено валцуване до крайна дебелина с малка степен на деформация и изправяне; реализира се на стан Дуо (VA553) за студено валцуване с опъваща машина, предназначен за придаване на необходимия комплекс от физико – механични показатели на метала.

От така получените три групи месингови ламарини в различно състояние (меко, твърдо и полутвърдо) от трите вида месинг и с четири различни крайни дебелини (0.4, 0.5, 0.6, 0.8 mm) са изработени пробни тела за изпитване на статичен опън с цел установяване на механичните показатели на изследваните материали, както и образци за изследване на микроструктурата им.

1. Установена е микроструктурата на изследваните образци за трите вида месинг при различните състояния и е определена големината на зърната. Материалите са в еднофазна област – α -месинг и средния размер на зърната от 25 – 30 μm намалява при достигане на твърдо състояние до 15-20 μm .

2. Осъществени са изпитвания на статичен едноосен опън, въз основа на които са определени якостта на опън, условната граница на провлачане и твърдостта на трите вида месинги в различно състояние. За всяко едно от състоянията на метала съпротивителните и пластичните показатели на образците с различни дебелини са на практика постоянни, което говори за устойчивост на осъществявания технологичен процес, т.е. механичните свойства на метала за дадено състояние са приблизително еднакви и не зависят от геометричния фактор - дебелина на листа. Стойностите на механичните показатели, определени чрез механичните изпитвания, служат за основа при оразмеряване на механично натоварените конструкции; при оценяване на поведението на метала при пластична деформация; при създаване на методи за контрол на качеството на продукцията и оценяване на поведението на металите при сложни напрегнати състояния.

3. В работата са представени снимки на най-често срещаните дефекти по повърхността на готовите продукти, които се получават при горещо и студено валцуване на цветни сплави. Изследваните месингови валцувани изделия с различна дебелина и състояние не показват наличие на дефекти, причина за което е доказаната в работата устойчивост на процеса на валцуване, факт подкрепен от получените резултати за желаната структура и свойства на изследваните материали.

В работи **(B19)** и **(B22)** обект на изследването е **ZnCuTi сплав**.

В **(B19)** са разгледани два технологични температурно-деформационни режима на студено валцуване на заготовки от ZnCuTi сплав с различно съдържание на Ti, получени от машина за непрекъснато леење и последващо валцуване.

Режим 1 –валцувани са ZnCuTi сплави с ниско съдържание на Ti. Получените от линията за непрекъснато леене и валцуване рулони се подлагат на студено валцуване до получаване на лента с дебелина 0.70 mm. Деформационният процес се осъществява на 5 прохода на четиривалцов агрегат с предна и задна намоталка. Получената лента, намотана на рулон се подлага на термично обработване – отгряване. Деформационният режим приключва с изправяне на лентата в изправяща машина, където металът се деформира с малка степен на деформация до получаване на желана геометрия и равнинност.

Режим 2 - валцувани са ZnCuTi сплави с високо съдържание на Ti. Получените от линията за непрекъснато леене и валцуване рулони се подлагат на преддеформационно нагряване (рекристализационно отгряване) в калпакова пещ при време-температурен режим, състоящ се от нагряване до температура на рекристализация за сплавта 330oC, задържане при тази температура за 7 часа и охлаждане до 250oC в пещта. Скоростта на нагряване и охлаждане е 50oC/h, а атмосферата на пещта е защитна – 100% азот. При този температурен режим на нагряване протичат структурни промени, при които зърната на сплавта стават равноосни, отстранява се наклепът и металът подобрява своята пластичност. Деформационният процес се осъществява на четиривалцов агрегат с температура на начало на валцуването 200°C. Следва изправяне в изправяща машина за получаването на добра равнинност и геометрия на лентата.

Изследвани са образци от крайния продукт след валцуване по *режимите 1 и 2*. Проведени са механични изпитвания при статичен опън и технологични изпитвания (огъване). Определени са механичните показатели на валцуваните листови продукти от двете сплави – с ниско и високо съдържание на титан. Установено е, че при прилагане на представените режими на валцуване се получават качествени изделия с желани структура и механични и технологични свойства, отговарящи на стандарта, което ги прави подходящи за изработване чрез огъване на покривни елементи. Лентите от ZnCuTi сплав с ниско съдържание на Ti, получена по *режим 1* имат по-добри пластични показатели и по-добри резултати от изпитването на огъване и следователно са по-подходящи за производство на улуци и свързващи елементи със сложна форма (ъгли и др.), а тези от ZnCuTi сплав с високосъдържание на Ti, получени по *режим 2*, притежават по-високи якостни показатели и задоволителни резултати от изпитването на огъване, което ги прави по-подходящи за покрития и облицовки на покривни конструкции.

В работа (B22) е установено влиянието на примесните и легиращи елементи Cu, Ti и Al върху микроструктурата на отлети и деформирани образци от ZnCuTi – сплав. Представени са технологиите за получаване на лента чрез непрекъснато леене и валцуване, последващо отгряване, студено валцуване в 6 прохода на валцов стан Roberson и изправяне.

Установена е микроструктурата на отлетите и деформираните образци. Отлетите образци са с ясно изразена дендритна структура, проявяваща се при охлаждането на разтопения метал, когато на повърхността се съдържат по-големи количества течен метал и по-висока температура и настъпи преохлаждане. Повърхността става нестабилна и втвърдяването настъпва под формата на дендрит. Колкото е по-бързо охлаждането, толкова повече нови ядра се зараждат, което ще доведе до намаляване на размера на дендритната структура. В литературата се споменава, че металите с по-фина дендритна структура, притежават по-висока жилавост.

Трудно могат да се определят големината на зърната на деформираният материал, произведен чрез непрекъснато леене и валцуване, тъй като преминавайки през валците зърната му се издължават. Дребнозърнестата структура може да се определи от големината на дендритите, колкото са по-малки, толкова по-дребни са зърната, както и от утаяването на TiZn15 по дендритните граници.

Микроструктурата на деформираните образци е характерна за рекристализирал метал. Наблюдава се вторична фаза, която представлява твърд разтвор на титан в цинка. Медта

съществува в твърд разтвор с цинка, в резултат на което е необходима по-висока температура на рекристализация.

Въз основа на анализа на експерименталните резултати е установено, че

□ летите образци притежават дендритна структура, по границите на която при бързо охлаждане се разполага $TiZn_{15}$, което води до издребняване на зърната;

□ повишаване на съдържанието на Al води до издребняване на зърната на деформираната сплав, което е предпоставка за подобри механични свойства;

□ промяната на концентрацията на Si не влияе съществено върху микроструктурата, но има благоприятно въздействие върху механичните свойства на деформираната сплав.

I-3. Провеждане на демонстрационни и изследователски лабораторни практикуми

(C35) Йорданова Р., Д. Ангелова, Св. Янкова, Учебно помагало по Пластична деформация и разрушаване на металите”, ХТМУ, 2014

В учебното помагало (C35) са представени теми от физичния и технологичен фундамент на пластичната деформация, разрушаването и механичните изпитвания на металите и сплавите. Разработени са демонстрационни и изследователски лабораторни практикуми по

- сплескване на метали и сплави като основа на технологичните процеси на технологиите на коване, валцуване, щампуване, пресуване;
- валцуване на лабораторен стан на черни и цветни метали и сплави в различни термо-деформационни условия;
- изправяне на валцувани дълги продукти на лабораторен стан чрез прилагане на едномерен опън.

I-4. Усъвършенстване на лабораторна технология за пластична деформация на метални материали, използвана при получаване на високотемпературни свръхпроводими сплави

(C33) Stoyanova-Ivanova A., Sv. Yankova, R. Jordanova, D. Angelova, High Temperature Superconducting YBCO tapes, *IVти пролетен семинар на докторантите и младите учени от БАН “Интердисциплинарна химия”*, 15-17 април 2011, Творчески дом на БАН – Витоша

Откриването на керамичните свръхпроводими материали в края на 1986г. предизвиква изключително голям интерес сред учените от цял свят. Използването им изисква получаването на дълги **високотемпературни свръхпроводими ленти (ВТСП)** с добри електрични и механични свойства.

Важна част в научните изследвания заема разработването на технологии за получаване на свръхпроводими жици и ленти, намиращи приложение в различни устройства - магнити, кабели и други електротехнически съоръжения.

Предвид факта, че високотемпературния свръхпроводим материал е керамика с достатъчно крехка структура, чупливост и други механични недостатъци, непозволяващи да бъдат изтеглени в жици и ленти, най-перспективният метод за производството на гъвкави високотемпературни свръхпроводими проводници се оказва методът „**ОКСИДЕН ПРАХ В ТРЪБА**” (ОРІТ метод).

Получени са **високотемпературни свръхпроводими ленти** на основата на композит от свръхпроводима керамика и сребро чрез използване на ОРІТ-метода, включващ процеси на запълване и уплътняване на оксиден прах в метален носител и последващи процеси на пластична деформация (валцуване) и спичане.

За изследванията представени в работа (C33) са използвани предварително синтезирани оксидни керамични прахове с три състава $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_z$; $\text{Y}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_z$ и $\text{Y}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_z$.

За синтезирането на тези прахове е използвана стандартна технология на твърд разтвор с допълнително насищане на кислород от стехиометрични количества на Y_2O_3 , CaCO_3 , BaCO_3 и CuO . Установена е свръхпроводимостта на праховете с посочените три състава.

Разработена е лабораторна технология за пластична деформация на свръхпроводимите прахове, прилагайки *ОРИТ метода*, при който като метален носител е използвана сребърна тръба с висока чистота, получена чрез пресуване и последващо изтегляне. Сребърните тръби, означени А, В и С са запълнени с прекурсор съответно от прахове от изброените по-горе състави.

Получени са ленти чрез прилагане на разработената лабораторна технология за пластична деформация върху подготвените образци „оксидна керамика-сребърна тръба”. Лабораторната технология включва: - процес на механично уплътняване на сребърната тръба, запълнена с прах чрез студено валцуване в 2 прохода; - горещо валцуване в пет прохода на получените след уплътняването равнинни полуфабрикати. Получените ленти с дебелина 0,3 mm по разработената лабораторна технология са без видими дефекти по повърхността.

Валцуваната лента е последващо термично обработена с цел спичане и синтезиране на 1:2:3 YBCO свръхпроводима фаза.

Чрез прилагане на студено и горещо надлъжно валцуване при получаването на свръхпроводимите ленти е установено влиянието на деформацията върху тяхната микроструктура и свръхпроводимите им свойства.

Процесите на деформация и последващо термично обработване съхраняват критичната температура на вложения свръхпроводим оксиден прах и водят до получаване на свръхпроводими ленти с по-висока плътност на критичния ток в сравнение със стойностите, измерени само на използвания прах.

Работата в тази нова сфера започва преди 2 години и в момента се подготвят проекти за нейното развиване в бъдеще.

I-5. Получаване и изследване на материали и сплави с повишени съпротивителни показатели и ограничени деформационни възможности

(B8) Гаврилова Р. Вл., С. Р. Янкова, Р. М. Йорданова, Цв. И. Лазарова, Проучване на сплави на желязна основа с високо съдържание на манган и хром при различни режими на термично обработване, *Научни известия на НТСМ* (ISSN 1310-3946), година XXIII, брой 1(164), февруари 2015, стр. 62-65

Обект на публикация (B8) са изследвания върху лети образци с повишена концентрация на С и постоянно съдържание на Сг и Мп като изходен състав.

Проведено е термичното обработване на няколко етапа - хомогенизация и стареене по различни режими. Определена е твърдостта. Направен е рентгено-структурен анализ чрез, който са получени данни за разпределението на елементите в изследваните сплави под формата на различни фази и съединения.

Направеният микроструктурен анализ показва, че сплавите с променливо съдържание на аустенито- и феритообразуващи елементи след хомогенизация са със структура, състояща се от аустенит, пределно количество неразтворена карбидна фаза от евтектичен тип от вида Me_3C , Me_{23}C_6 и самостоятелни ванадиеви карбиди за сплавта, съдържаща ванадий. Данните от металографския анализ са аналогични с тези от рентгеноструктурния анализ.

Установено е влиянието на легиращите елементи върху структурообразуването и механичните показатели в процеса на стареене при еднакво изходно съдържание на основните компоненти – Mn, Cr, C, N: - стареенето протича най-интензивно при 500 и 700°C и е съпроводено с отделяне на най-голямо количество втора фаза с различни форма и разпределение; - при около 700°C настъпва разпадане на твърдия разтвор с отделяне на перлитоподобни колонии. Отделянията са в най- голям обем при тази температура; - при 900°C във всички изследвани състави процесът протича по посока на обратното разтваряне на втората фаза в аустенитната матрица. Тенденцията е най-силно изразена в сплавта, съдържаща никел.

От проведените изследвания на сплави на желязна основа с високо съдържание на манган и хром, става ясно, че оптималния режим за термично обработване на този тип материали е стареене при температура 500°C и време на задържане 5 часа.

(B24) Йорданов Б. И., Д. М. Кръстев, К. С. Клявков, Р. М. Йорданова, С. Р. Янкова, *Формиране на карбидни фази в процеса на карбидизация на метален хром в условията на електротермичен въртящ се слой, Научни известия на НТС по Машиностроене, година XX, бр. 1 (133), 2012, стр. 93-96, 2012*

Високите температури и агресивност на средите в които работят материалите на 21 век налагат различни критерии при създаването на нови и подобряването на свойствата на вече работещи в техниката детайли и конструкции. Използването на материали, удовлетворяващи все по високите изисквания на съвременната индустрия и технологии се явяват карбидите на преходните метали (Ti, Mo, Cr, V, W и т.н.). Тези съединения притежават високи температури на топене, твърдост и изнosoустойчивост при високи работни температури, висока термична и химична устойчивост. Карбидите на преходните елементи с успех могат да се използват, като високотемпературни материали в авиационната, космическата, атомната и обща енергетика, техника, работеща при високи налягания и агресивни среди.

Изходната суровина за изследване на процеса на формиране на карбидна фаза в процеса на карбидизация в условията електротермичен въртящ се слой (ЕТВС) са метален хром смесен с дисперсен графит фракция 100 µm. Металният хром и дисперсен въглерод под формата на графит се смесват в пропорция за достигане на пълната стехиометрия на крайния продукт хромов карбид (Cr₂C₃), като количеството на графита се взема с 1,5 % по-голямо от стехиометричното съотношение в това съединение и се поместват в печното пространство, което се запълва в диапазона от 30 – 50 %.

Експериментите са проведени при температура 1600°C и различни времена на изотермично задържане. Измерена е дебелината на формираният се карбиден слой при всяко време на изотермично задържане. На крайният продукт е направено рентгеноструктурно и микроструктурно изследвания.

Въз основа на получените резултати е установено, че времето за реакция на изходните дисперсни материали, метален хром и графит при 1600 °C в условията на ЕТВС за получаването на двата карбида на хрома е кратко (15-20 min); висока скорост за пълно реагиране на металният хром до висш карбид на хрома (Cr₃C₂) при температури от 1600 °C и време от 30 min в условията на ЕТВС; изотермичното задържане от 30 - 60 min при 1600 °C не променя крайният състав на получения хромов карбид, единствено предизвиква осъществяване на карбидизационен процес и за частици с по-голяма изходна едрина на металния Cr.

(C32) С. Недев, А. Данаилов, С. Янкова, Р. Йорданова, *Компютърен интерфейс за модернизиране на универсална машина за изпитване на опън, натиск и циклично натоварване FPZ100, ИЗВЕСТИЯ на Съюза на учените–Сливен (ISSN 1311-2864), том 29, книга 3, стр.5-9, 2015*

Направена е модернизация на универсална тестова машина FPZ100, която включва монтиране на интерфейсна платка и сензори за измерване на температурата, промяната на дължината и силата, приложена върху тестован образец. Данните се предават в цифров вид и се записват на компютър, което е предпоставка за използване на специализирани числени методи с цел по-точно пресмятане на величините, свързани с процесите на опън, натиск и огъване на материалите. Направените подобрения са в основата на разработен софтуер за визуализиране на резултати от изпитване на статичен опън.

II. Изследване на умората в различни валцувани стомани

Уморното разрушаване на металите може да се характеризира като процес на постепенно натрупване на увреждания в материала под действието на циклично променящо се натоварване, довеждащо до образуване на пукнатини на умора, развитието им и последващо разрушаване.

Класическите експерименти по дълги пукнатини, проследяващи разпространяването на уморните пукнатини, се описват от линейно-еластичната механика на разрушаване (ЛЕМР), докато късата уморна пукнатина, съпоставима с микроструктурата и силно влияеща се от нея, се развива със значителна пластична зона във върха си, поради което апаратът на ЛЕМР е неприложим при нейното описание. Ето защо е възникнал съвременен подход за изучаване на процеса на умора, базиращ се на изучаване на зараждането и възможностите за разпространяване на късите уморни пукнатини (КУП).

Скоростите на нарастване на КУП са значително по-високи от съответните скорости на нарастване на дългите уморни пукнатини (ДУП), проследявани при класическите експерименти на умора.

През последните 20 години изследователите са насочили своето внимание към определяне на дълготрайността на детайли, работещи в условия на циклично натоварване чрез анализиране на резултати, получени по метода на проследяване на нарастването на къси уморни пукнатини.

Когато уморните пукнатини са с размер, сравним с размера на зърната, те се наричат *микроструктурно къси*. Когато размерът на пластичната зона във върха на уморната пукнатина е сравним с размера на самата пукнатина, пукнатините се наричат *физически малки уморни пукнатини*.

Изпитванията по къси уморни пукнатини се провеждат върху гладки (полирани) образци без наличието на надрези и концентратори на напрежението. Нарастването на пукнатините се наблюдава от самото им зараждане до разрушаването на пробното тяло с помощта на репликационна техника, пряко наблюдение или друг високочувствителен метод за следене. Скоростта на нарастване на пукнатината в този случай се представя в зависимост от нейната дължина, като уморният процес се описва със зависимостите “*Скорост на нарастване на пукнатината, da/dN [μm /цикъл] – Дължина на пукнатината, a [μm]*”.

Разпространяването на КУП значително се влияе от микроструктурните параметри. Ето защо, изучаването на влиянието на микроструктурата върху зараждането на късите уморни пукнатини, скоростите на нарастването им, както и пътят на тяхното разпространяване през микроструктурата на металите са изключително актуални изследователски проблеми.

Изследователската работа, свързана с изследване и изучаване на умората и уморното поведение на метали може да се обобщи на база на изследваните материали. Проведени са изследвания при умора на стомани от различен клас и предназначение:

- нисковъглеродна конструкционна стомана - стомана 09Г2,
- корозионноустойчиви стомани за водородната енергетика – 304 (Cr-Ni стомана), 316 и 316L (Cr-Ni-Mo стомане) и SCM 435 (Cr-Mo стомана)
- пружинни стомани – BS250A53 и EN10270-1SH (високовъглеродни стомани);

II-1. Изследване на уморния процес в различни класове конструкционни стомани

2.1.1 Изследвания на уморното поведение в нисковъглеродна стомана 09Г2

(A6) Donka Angelova, Rozina Yordanova, Svetl a Yankova, Fatigue crack development in a low-carbon steel. Microstructure influence. Modelling, *ELSEVIER, Procedia Structural Integrity*, Volume 2, pp. 2726-2733, 2016;

(C30) Angelova D., R. Yordanova, Sv. Yankova, Fatigue crack paths in a low-carbon steel. Modelling of fatigue behaviour, *Proceedings of The Fifth International Conference on Crack Paths CP 2015*, Ferrara, Italy, 16 - 18 September, 2015

Изследвана е умората в нисковъглеродна нисколегирана конструкционна стомана 09Г2, предназначена за крайморски съоръжения и конструкции. Стоманата е с ферито-перлитна структура.

Изпитани при умора са три групи образци в зависимост от схемата на натоварването:

- **Група А:**

Схема на приложеното циклично натоварване – “опън-опън” с коефициент на асиметрия $R=0.1$ и честота на циклично натоварване – $f=190$ Hz. Експериментите са проведени върху полирани цилиндрични пробни тела с форма на пясъчен часовник в условия на въздух и приложен амплитуден интервал на напрежението $\Delta\sigma = 396$ МПа.

- **Група В:**

Схема на приложеното циклично натоварване – симетрично “огъване при въртене” с коефициент на асиметрия $R= -1$ и честота на циклично натоварване – $f=11$ Hz. Експериментите са проведени върху полирани цилиндрични пробни тела с форма на пясъчен часовник в условия на въздух и приложен амплитуден интервал на напрежението $\Delta\sigma = 580$ и 620 МПа;

- **Група С:**

Схема на приложеното циклично натоварване – “чисто огъване” с коефициент на асиметрия $R= -1$ и честота на циклично натоварване – $f=5$ Hz. Експериментите са проведени върху плоски образци с предварително нанесени дефекти чрез FIB-техника в условия на въздух и приложен амплитуден интервал на напрежението $\Delta\sigma = 580$ МПа

Проследяването на зараждането и разпространяването на уморните пукнатини при образци от **групи А и В** е осъществено чрез прилагане на репликационна техника, състояща се от вземане на ацетатни реплики от повърхността на образците през определен брой цикли и последващото им наблюдение под микроскоп с цел откриване и измерване на дължината на уморните пукнатини.

Плоските образци с предварително нанесени централни и ръбови дефекти от **група С** са наблюдавани директно, използвайки възможностите на сканиращия електронен микроскоп. Уморните пукнатини започват своето разпространение от направените дефекти, като тяхното разпространяване през микроструктурата е наблюдавано чрез СЕМ, като за целта експериментът е прекъсван на всеки 1000 цикъла до разрушаване на образца.

Изследванията и получените резултати, представени в публикации (A6), (C30) са фокусирани върху изучаване на връзката между скоростта и пътищата за разпространяване на късите уморни пукнатини в стомана 09Г2 и нейната микроструктурата, при отчитане на съществени фактори за умората като схемата на натоварване, приложените циклични напрежения, формата на образците, наличието на предварително нанесени дефекти, честотата на циклично натоварване.

За трите групи образци са получени следните резултати:

- за дължината на пукнатината в зависимост от броя цикли – построени са зависимостите “ $a-N$ ”;

- изчислени са скоростите на разпространяване на уморните пукнатини – построени са зависимостите “ $da/dN-a$ ”. Получените данни за чисто огъване показват по-високи стойности за разпространение на пукнатината и по-къс уморен живот в сравнение с данните получени за натоварване огъване при въртене;

- направено е математично описание на скоростите на разпространяване на късите уморнипукнатини, като е приложен параболично-линеен модел "скорост на нарастване на пукнатината – дължина на пукнатината", отчитащ спецификата на нарастването на уморните пукнатини в три режима – като микроструктурна къса, физически малка и дълга пукнатина. Установено е, че намерените модели са с много добра адекватност, проверена чрез съпоставяне на експериментално полученото и изчисленото по модела време на уморен живот. Те успешно могат да се използват за прогнозиране на уморния живот на стоманата при съответните експериментални условия. Разработеният параболично-линеен модел е приложим за прогнозиране на уморния живот и описване на скоростта на разпространяване на късите уморни пукнатини в други метали и сплави, при отчитане на конкретните експериментални данни и условия;

- установено е влиянието на микроструктурните характеристики на стоманата върху уморния процес и причините за промяна в скоростите на разпространяване на късите уморни пукнатини. Установени и определени са микроструктурните бариери, които забавят и/или спират нарастването на късата пукнатина и дефинират нейните три режима на нарастване;

- посредством сканираща електронна микроскопия са анализирани пътищата за разпространяване на уморните пукнатини през микроструктурата, като ясно е показано влиянието на отделните феритни и перлитни фази стома 09Г2. Скоростта на разпространяващата се пукнатина намалява, когато пукнатината минава от феритна в перлитна област, на ферито-феритна или перлитно-перлитна граница на зърната, или препятствия при които пукнатината променя направлението си или се разклонява. Редиците от надлъжни неметални включвания увеличават скоростта на пукнатината, служейки ѝ като път на разпространяване. Построени са комбинирани графики „Микроструктура–Скорост на нарастване на пукнатината–Дължина на пукнатината”. Те дават полезна информация, дори и без допълнителни подробни микроструктурни наблюдения.

- чрез СЕМ детайлно са изследвани и изучени ломовете на разрушаване на изследваните образци, изпитани при умора при различни схеми на натоварване.

2.1.2 Изследвания на уморното поведение в пружинни стомани

(A3). Angelova, D., Yordanova, R., Lazarova, T., **Yankova, S.**, On fatigue behavior of two spring steels. Part I: Wöhler curves and fractured surfaces, *Frattura ed Integrità Strutturale* 10 (37), pp. 249-257, 2016, www.scopus.com SJR 0.349

(A4). Angelova D., Yordanova R., Lazarova, T., **Yankova, S.**, On fatigue behaviour of two spring steels. Part II: Mathematical models, *Frattura ed Integrità Strutturale* 10 (37), pp. 258-264, **2016**, www.scopus.com SJR 0.349

(A4-a). Donka Angelova, Rozina Yordanova, **Svetla Yankova**, On Fatigue Behaviour of Two Spring Steels. Part II: Mathematical Models, *ELSEVIER, Procedia Materials Science* (ISSN: 2211-8128) 3 (2014) 1459 – 1466

(B18). Л. Николова, Р. Йорданова, **Св. Янкова**, Вюлерова крива на пружинна стомана, изпитана на умора при симетрично огъване при въртене, *Инженерни науки*, 3, 2013

(B20) D. Angelova, R. Yordanova, L. Nikolova, **Sv. Yankova**, Investigation on fatigue Behavior and Fatigue crack Growth of a Spring Steel. Part II: Mathematical description and Analyses, *Scientific Proceedings*, Year XXI, 2(139), 2013, pp. 244-248

В публикации (B18) и (B20) са представени резултати от проведени собствени експерименти при умора на пружинна висиковъглеродна високояка стомана EN10270-1SH,

подложена на схема на натоварване “огъване при въртене” и честота на циклично натоварване 11 Hz при различни амплитудни интервали на приложеното напрежение.

Получени са резултати за времето на уморен живот на образците, изпитани при различните експериментални уморни условия, въз основа на които е построена кривата на Wohler (уморна крива) за изследваната стомана. Намерен е аналитичният вид на кривата на Wohler, въз основа на апроксимиране на експерименталните данни, което дава възможност за прогнозиране на времето на уморен живот на образци от изследваната стомана, изпитани при напрежения от високоциклавата област, различни от изследваните.

Направен е обстоен анализ на разрушените повърхности посредством сканиращ електронен микроскоп. Установени са характерните за уморното разрушаване зони върху повърхностите на разрушаване, като върху тези на образците, изпитани при най-високото напрежение, се наблюдава зараждане и разпространяване на няколко уморни пукнатини, понижавайки уморната им дълготрайност.

В (B20) са представени резултати от направеното математическо описание на получените експериментални данни за скоростите на разпространяване на уморните пукнатини в изследваната стомана. По време на изпитването на умора е проследено зараждането и разпространяването на повърхностни къси уморни пукнатини в образци, изпитани при $\Delta\sigma = 1200$ и 1400 МПа. За целта е приложена репликационна техника, позволяваща при определен брой натрупани цикли да се взема отпечатък от повърхността на образеца, последващо микроскопско наблюдение на тези реплики с цел установяване на уморна пукнатина и проследяване на нейното нарастване до разрушаване на образеца. Получени са данни за дължините на повърхностните уморни пукнатини, а [μm]. Наблюдавани са и са проследени голям брой пукнатини, които се развиват самостоятелно и едновременно по повърхността на образеца.

Въз основа на получените данни са изчислени скоростите на разпространение на пукнатините. Резултатите са представени графично в координати «Дължина на пукнатината – брой цикли» и «Скорост на разпространение на уморната пукнатина – дължина на пукнатината».

В работата е направено математическо описание на уморното поведение на образците, изпитани при различните амплитудни интервали на напрежението. Моделирането е направено чрез параболично-линеарен модел, представящ трирежимното разпространяване на късите уморни пукнатини. Моделът е съобразен с микроструктурните характеристики, оказващи силно влияние върху процеса на разпространяване на късите уморни пукнатини, особено в първите два режима – като микроструктурни къси и физически малки пукнатини. Приложена е методика за определяне на микроструктурните бариери, пред които уморната пукнатина намалява скоростта си, спира, изчаква определен брой цикли, след което продължава да се разпространява. Доказана е адекватността на предложения модел чрез сравняване на експериментално времена на уморен живот с изчислените по модела.

Публикациите (A3) и (A4) представят допълнителни резултати от проведените на умора при “огъване при въртене” собствени експерименти върху пружинна стомана EN10270-1SH, като те са сравнени с литературни експериментални данни от изпитвания по къси уморни пукнатини върху пружинна стомана BS250A53, изпитана на въздух и корозионна среда при схема на натоварване “пълно обратимо усукване”.

В (A3) са представени резултати от уморни и микроскопски изследвания на върху образци от две стомани - EN10270-1SH и BS250A53. Стомана EN10270-1SH е високояка евтектоидна стомана с микроструктура от редуващи се феритни и цементитни ламели. Стомана BS250A53 е силико-манганова високовъглеродна нисколегирана пружинна стомана.

Посредством наблюдение със СЕМ е направено подробно изучаване на микроструктурата на разрушените 12 образци от стомана EN10270-1SH, изпитани при различни амплитудни интервали на напрежението. Представена е Вьолерова крива (“Амплитуден интервал на приложеното напрежение – брой цикли до разрушаване”), която е

аналитично представена и всяка експериментална точка от нея е визуализирана с СЕМ-изображение на уморния лом.

Аналогично е построена и Вюлеровата крива за стомана BS250A53, намерен е нейният аналитичен вид. Графичната интерпретация е обогатена със СЕМ-изображения на различните стадии на разпространяване на уморната пукнатина в образци, изпитани съответно при най-високия и най-нисък амплитуден интервал на приложеното напрежение.

Аналогично са представени зависимости между микроструктурата, дължината на разпространяващата се пукнатина и броят цикли. Такъв вид нови комбинирани интерпретация на експерименталните резултати и микроструктурата дават по-пълна картина за уморния процес, протичащ в изследваните стомани, дава ценна информация за връзката между уморните и структурните характеристики и позволява адекватно прогнозирането на уморното поведение и времето на уморен живот.

Представените Вюлерови криви на двете стомани показва, че натоварването, повърхностните условия и средата са едни от най-силно влияещите фактори. В стомана EN10270-1SH, за един от най-високите амплитудни интервали на приложеното напрежение ($\Delta\sigma = 1200$ MPa) развитието на късите уморни пукнатини и наблюдаваните микроструктури показват зараждане, разпространение и сливане между главната пукнатина и вторичните пукнатини около нея. Това води до загуба на пластичност в тази област, сливане на пукнатините и пълно разрушаване на образеца. В стомана BS250A53 подобна ситуация може да се наблюдава само при комбинираното влияние на корозионна среда и при високи интервали на напрежение ($\Delta\tau = 817$ MPa).

Публикация (A4) е продължение на публикация (A3), в която се засягат въпросите относно разпространяването на наблюдаваните и проследени голям брой, едновременно развиващи се повърхностни къси уморни пукнатини в двете изследвани стомани.

Изпитаните образци са разделени в три групи. Първата група включва образци от стомана EN10270-1SH, изпитани при умора на въздух при огъване при въртене, а другите две групи – образци от стомана BS250A53, изпитани при умора при усукване съответно на въздух и в корозионна среда (0.6M NaCl). Посредством прилагане на репликационна техника са получени експериментални данни за дължината на пукнатината в зависимост от приложения брой цикли на натоварване, съответно за стомана EN10270-1SH са получени от собствени експерименти, а за стомана BS250A53 – по литературни данни.

Построени са зависимостите „Дължина на пукнатината – брой цикли“. Данните са използвани и за изчисляване на скоростите на разпространяване на уморните пукнатини. Построени са зависимостите „Скорост на разпространяване на уморната пукнатина da/dN – дължина на пукнатината, a “.

Поведението на късите уморни пукнатини в две марки пружинни стомани е изследвано и аналитично моделирано, като е направено математично описание на експерименталните данни – параболично-линеен модел, описващ скоростта на нарастване на пукнатината.

За описание на уморното поведение в стомана EN10270-1SH са разработени три версии на параболично-линейния модел, описващ скоростите на нарастване на пукнатините в зависимост от тяхната дължина. Моделните версии са направени при използване само на резултатите за скоростите на разпространение на главната (разрушаващата) пукнатина или при отчитане на влиянието на вторичните пукнатини. Разработените моделни версии са проверени чрез сравняване на експерименталните данни за времето на уморен живот с тези, изчислени от предложената моделна версия. Установено, че моделната версия, отчитаща главната пукнатина едновременно с влиянието на вторичните пукнатини най-добре описва уморния процес, в резултат на което отклонението между изчисленото по модела време на уморен живот и експериментално полученото е най-малко – 10%. Моделът е приложен при прогнозиране на уморният живот на пружинни стомани, изпитани при съответните експериментални условия.

II-2. Изследване на уморния процес в стомани, използващи се във водородните технологии и по-специално в резервоари и съдове, преносни системи и съоръжения за транспортиране или практическо използване на водород под високи налягания.

През последните години, в световен мащаб, са направени много научни изследвания на едни от най-атрактивните алтернативни енергийни технологии, а именно водородните технологии. Развитието на водородните технологии е главно в две направления. Първото е свързано с производството на водород, а второто – с намирането и изследването на подходящи материали, в това число и метални материали за неговото съхранение и транспортиране. Второто направление е пряко свързано с изучаване на въздействието на водорода върху структурата и свойствата на тези материали.

Все още има редица неизяснени въпроси относно влиянието на водорода върху металите и сплавите. Известно е, че водородът влияе върху микроструктурата на стоманите, като променя кристалната решетка, която оказва влияние върху механичните им показатели и уморния им живот. Явлението е известно като водородна крехкост и играе основна роля при корозионната умора, свързана с протичането на реакция върху катода. Съществуват няколко механизма, обясняващи водородната крехкост, които са свързани с: критичната концентрация на водород, предизвикваща декохезия на метала; зараждането и разпространението на междукристалитни уморни пукнатини, вследствие на адсорбцията на водород; повишената пластичност във върха на пукнатината.

В публикации **(A2), (B23), (B17), (B11), (B16), (C31)** са представени резултати от изследвания върху умората в четири марки стомани, предназначена за съхраняване и транспортиране на водород. Използвани са цилиндрични образци без и с предварително нанесен отвор с диаметър и дълбочина от 100 μm . За да се установи влиянието на водорода върху структурата и уморните процеси в изследваните стомани са направени сравнителни анализи между резултатите, получени при изпитването на оригинални ненаводородени образци и такива предварително наводородени.

В публикациите са използвани, анализирани и математически обработени и интерпретирани резултати от собствени експерименти, така и литературни данни, публикувани от колективи, работещи в Япония (HYDROGENIUS Institute, Kyushu University, Japan) и САЩ (Sandia National Lab, California & the University of Tufts, Medford, Massachusetts, USA).

2.2.1. Нисковъглеродни корозионно устойчиви стомани – 304, 316 и 316L

(A2). Angelova, D., Yordanova, R., **Yankova, S.**, Analysis of fatigue behaviour of stainless steels under hydrogen influence, *Frattura ed Integrita Strutturale* 10 (37), pp. 60-68, **2016**, www.scopus.com SJR 0.349

(B23) Тодорова З.С., Д.Г. Ангелова, Р.М. Йорданова, **С.Р. Янкова**, Изследване на уморните показатели на стомана 316L, предназначена за използване във водородната енергетика, *Научни известия на НТС по Машиностроене*, година XX, бр. 1 (133), 2012, стр. 81-84, 2012

(B17) З. Тодорова, Р. Йорданова, **Св. Янкова**, Изследване на умората в стомана, използвана за съдове и инфраструктура за съхраняване и транспортиране на водород, *Инженерни науки*, 1, 2013

(B11) Манавска А. М., Р. М. Йорданова, Св. Р. Янкова, Ц. И. Лазарова, З. Св. Тодорова, Изследване на класическата умора и акумулираното повреждане в корозионно устойчива стомана, *Научни известия на НТСМ* (ISSN 1310-3946), Година XXIII, бр. 2(165), юни 2015, стр. 226-229

В публикация (A2), три корозионноустойчиви стомани, марки ASTM 304, 316 и 316L, с приложение във водородната енергетика за направа на съоръжения за транспортиране и съхраняване на водород, са изследвани под въздействието на две групи уморни условия:

- **група А** - умора при триене на повърхности
- **група В** - умора при схема на натоварване “опън-натиск” (образци с отвор от стомани 304, 316 и 316L; различни честоти на циклично натоварване; различни приложени амплитуди на напрежението
- **група С** – умора при схема на натоварване “симетрично огъване при въртене” (цилиндрични образци от стомана 316L; честота на циклично натоварване 11 и 50 Hz).

Тестовете са проведени съответно при водород под високо налягане и на въздух. Използвани са два типа образци – наводородени и ненаводородени. В резултат на получените изследвания е установено, че водородът оказва силно влияние върху процесите на умора, както при умора при триене на повърхности, така и при умора при опън-опън и огъване при въртене, като интензифицира зараждането и разпространяването на уморните пукнатини.

Установено, че предварително наводородените образци променят адсорбционната си способност по време на умората при триене на повърхности, тъй като микроструктурата на стоманата се трансформира и се превръща в мартензитна. В литературата са представени зависимостите “коефициент на тангенциалната сила при триене – амплитуда на приложеното напрежение” и “Граница на умора при триене на повърхности-твърдост по Викерс”. Данните показват някои различия в поведението на наводородените и ненаводородени образци, като е установено силното влияние на фактора честота на циклично натоварване, който в комбинация с високото налягане на водородния газ води до мартензитно превръщане на структурата и понижаване на уморния живот. Получените резултати са представени чрез построената Вюлерова крива, която е в допълнение към построените зависимости в координати „Дължината на късата уморна пукнатина–брой цикли” и “Коефициента на тангенциалната сила–Амплитудата на напрежението”. Намерените уморни характеристики са анализирани и сравнени при различните условия на натоварване и показват, че стомана 316L показва по-добри уморни характеристики, т.е. представя се по-добре на тестовете.

В публикации (B23) и (B17) са представени основно резултати от собствени уморни експерименти върху стомана 316L, проведени при различни уморни условия. Тествани са на умора при схема на натоварване “огъване при въртене” полирани цилиндрични образци с форма на пясъчен часовник при 12 различни амплитудни интервала на приложеното напрежение ($\Delta\sigma = 400, 480, 520, 560, 600, 640, 680, 720, 760, 800, 880$ и 920 МПа) и честота на циклично натоварване $f=11\text{Hz}$. Експериментите са проведени в областта на многоцикловата умора, обхващаща напреженията под границата на провлачане на изследвания материал.

Въз основа на получените резултати за времето на уморен живот е построена уморната крива (Вюлерова крива; S-N крива). Тя е основният източник на информация относно съпротивителните характеристики на метала срещу уморно разрушаване. Уморната крива илюстрира зависимостта между променливата компонента на напрежението (в случая $\Delta\sigma$) и съответстващия уморен живот на материала в цикли, N.

Намерен е аналитичният вид на уморната крива, което дава възможност за прогнозиране на времето на уморен живот на образци от изследваната стомана, изпитани при напрежения от високоцикловата област, различни от изследваните. Намерена е границата на умора, която за стомана 316L, изпитана на умора при огъване при въртене във въздушна среда, е 400 МПа.

Получените резултати от собствените експерименти са сравнени с литературни данни за същата стомана, получени от С. Skipper от университета Tufts, Medford, Massachusetts, USA, и Мураками и Канезаки - Институт HYDROGENIUS на Университета Кюшу, Япония. Литературните данни, показват противоположни зависимости в поведението на една и съща стомана по отношение на сравнението на умората в ненаводородени и наводородени

образци. Явно, че в единия случай (С. Skipper) става въпрос за водородно окрежквяване, докато в другия (Мураками и Канезаки) за водороден ефект върху стоманената структура пред и около разпространяващата се пукнатина. Безспорно един от определящите фактори за това е честотата, която асистира проникването на водорода на микроравнище.

Публикацията **(B11)** представя първоначални резултати на колектива в едно ново направление, чрез което се стремим да постигнем по-задълбочено изучаване на уморните процеси в стомани, а именно чрез прилагане на акумулираща умора. Процесът на умора на металите се интензифицира както от наличието на корозионна среда, така и от прилагането на натоварвания, които запазват формата на цикъла с течение на времето, но променят големината на максималното напрежение. Процесът е известен като акумулиращо уморно повреждане. Такива променящи се във времето натоварвания, при които се променя товарът, честотата на натоварване и формата на цикъла, са често срещани по време на експлоатацията на конструкции и детайли от метални материали. Ето защо, развитието на бъдещите ни изследвания в тази посока е изключително актуално.

Проведено е изследване на класическа умора в корозионно устойчива стомана 316L и е изучено акумулираното повреждане в изследваната стомана. Построена е Вюлеровата крива (уморна крива) за изследваната стомана при схема на циклично натоварване „симетрично огъване при въртене“. Получени са експериментални данни за уморното поведение на образец, подложен на акумулиращо повреждане, включващо етапи на циклично натоварване при симетрично огъване при въртене, статично натоварване при огъване и разтоварване, последващо циклично натоварване с повишаване на амплитудния интервал на цикличното натоварване през определена стъпка за определен брой цикли, до разрушаване на образца. Проведеното изследване е първото от серия изследвания върху акумулиращо повреждане на образци от изследваната стомана, провеждани с цел изучаване на уморното поведение на стомана 316L при променливи натоварвания, доближавайки се да реалните експлоатационни условия.

2.2.2. Cr–Mo стомана марка JIS SCM435

(B16) Йорданова Р.М., Ангелова Д.Г., Лазарова Цв., **Янкова Св.Р.**, Влияние на честотата на циклично натоварване върху уморния процес в стомана SCM435, *Научни известия на ИТСМ*, година XXII, брой 1(150), юни 2014, стр. 130-133, 2014

(C31) Donka Angelova, Rozina Yordanova, **Svetla Yankova**, Ralitsa Pavlova, Hydrogen influence on fatigue in a Cr-Mo steel, *Proceedings of the 2nd Conference of the International Journal of Structural Integrity*, Funchal, Madeira, Portugal, 1 - 4 September, 2014

В публикации **(B16)** и **(C31)** са анализирани и подходящо интерпретирани литературни експериментални данни, получени от Мураками, който изследва влиянието на водорода върху уморните процеси в изследваната стомана SCM 435, използвайки два вида образци: ненаводородени (оригинални стоманени образци, не подложени на въздействието на водород) и изкуствено наводородени образци чрез потапяне за 24 часа в 20% разтвор на амониев тиоцианат ($\text{NH}_4 \text{SCN}$). Температурата на разтвора е 50°C . Съдържание на водород на ненаводородения образец е 0,26 ppm, а на наводородените - 10 ppm (съдържанието на водород е измерено 1,5 часа след наводородяването).

Изпитаните два вида образци от тази стомана (наводородени и ненаводородени) са подложени на умора при схема на натоварване “симетричен опън-натиск” и различни честоти на циклично натоварване.

Въз основа на литературните експериментални данни за дължините на пукнатините в зависимост от броя на приложените цикли са изчислени скоростите на разпространяване на проследените уморни пукнатини в зависимост от честотата и вида образец (с или без H_2). Построени са зависимостите „Дължина на пукнатината – брой цикли“, „Честота на циклично

натоварване – време на уморен живот” и „Скорост на нарастване на пукнатината – дължината на пукнатината” и “Скорост на разпространяване на пукнатината – дължина на пукнатината”.

Представен е параболично-линеен модел, описващ нарастването на уморната пукнатина в изследваната стомана в три стадия - като микроструктурно къса, физически малка и дълга пукнатина. Определени са микроструктурните бариери, пречещи нарастването на пукнатината и оказващи влияние върху скоростта ѝ на разпространяване.

Направеното математическо моделиране показва качествено подобие на получените двойно-параболично-линейна криви за наводородените и ненаводородени образци от изследваната стомана, изпитани при различни честоти на циклично натоварване. Намерените моделни криви дават възможност за прогнозиране на поведението на умора при различни условия на натоварване. Адекватността на представените модели се проверява и доказва чрез сравняване на експерименталните уморни животи и тези, изчислени от моделите. Грешката (отклонението), която се получава във всички случаи е по-малко от 10 %.

Друг важен момент е, че темпът на растеж на пукнатините се увеличава с намаляване на честотата на циклично натоварване. Установено е, че водородното въздействие интензифицира силно уморния процес, като наблюдаваното влияние на водорода в наводородените образци към по-ранно зараждане на уморна пукнатина, по-бързо разпространяване на късата уморна пукнатина с високи скорости и всичко това резултиращо в понижаване на уморния живот в сравнение с ненаводородените образци се засилва с намаляване на честотата на цикличното натоварване. Необходими са допълнителни изследвания върху влиянието на ниските честоти върху уморния процес на наводородени стомани. Всичко това ще позволи адекватен избор на стомани за съответното приложение във водородната промишленост.

III. Изследване на метални материали със специално предназначение

III-1. Изследване на механичните показатели на метални аморфни сплави и специфичните им характеристики: термичната устойчивост, вискозитет, стъклообразуваща способност.

Аморфните метални сплави (металните стъкла) представляват нов клас материали в съвременното материалознание. Те могат да бъдат получени от стопилка при охлаждане с достатъчно голяма скорост, за да бъде избегната кристализация. При повечето метални стъкла критичната скорост на охлаждане за избягване на кристализация е от порядъка на 10^6 K/s. Поради тази причина металните стъкла са материали, които представляват подчертано неравновесни системи от термодинамична гледна точка. Свойствата им зависят както от условията на получаване, така и от режима на последваща термична и термомагнитна обработка. Повечето метални стъкла притежават висока якост и добра пластичност. За да се изяснят перспективите за практическото им приложение са необходими изследвания за свойствата им, термичната устойчивост и стъклообразуващата способност.

(В 25) Стоянова, Л., Фазакас, Е., Варга, Л. К, Янкова, С. и К. Русев, Термична устойчивост, вискозитет и стъклообразуваща способност на аморфни сплави $Hf_{(100-x)}Cu_x$ ($x=30$ и 40 ат.%) *Научни известия на НТС по Машиностроене*, година XVII, бр. 5 (115), 2010, стр.186 -193, 2010

Обект на публикация (В 25) са изследвания, свързани с термичната устойчивост и вискозното поведение на две бинерни аморфни сплави $Hf_{(100-x)}Cu_x$ ($x = 30$ и 40 ат.%), всяка от които е застъклена при две различни скорости на въртене на охлаждащия диск. Изходните легатури на сплавите $Hf_{(100-x)}Cu_x$ са изготвени чрез индуктивно стапяне на чисти елементи във водоохлаждаема медна кокила под аргонова атмосфера. Около 10g от сплавите са затвърдени по метода Предене от стопилка върху охлаждащ диск (CBMS) под защитна

аргонова атмосфера и периферни скорости на охлаждащия диск $V_{pr} = 30\text{m/s}$, 41m/s и 42m/s . Аморфността на получените ленти е потвърдена чрез рентгенова дифракция (Brucker ASM 200) и диференциална сканираща калориметрия (Perkin Elmer DSC 2C).

Кристализационните и вискозни характеристики на получените $\text{Hf}_{(100-x)}\text{Cu}_x$ сплави са изследвани с помощта на диференциален сканиращ калориметър Perkin Elmer DSC 2C и кварцов дилатометър Perkin Elmer TMS 2. Калориметричните изследвания са проведени при 3 различни скорости на нагряване от 5 до 40K/min , с цел определяне на активиращата енергия на кристализационния процес, а вискозитетът е измерен при скорост на нагряване 20K/min . Експерименталните резултати за вискозитета са интерпретирани на базата на Теорията на свободния обем (ТСО).

Установено е, че термичната устойчивост на изследваните бинерни аморфни сплави $\text{Hf}_{(100-x)}\text{Cu}_x$ е с около 85K по-висока от тази на $\text{Zr}_{(100-x)}\text{Cu}_x$. Температурите на начало на кристализация са 721K за $\text{Hf}_{70}\text{Cu}_{30}$ и 769K за $\text{Hf}_{60}\text{Cu}_{40}$.

Температурите на стъклопреход на сплавите са 692K за $\text{Hf}_{70}\text{Cu}_{30}$ и 727K за $\text{Hf}_{60}\text{Cu}_{40}$ и са соколо 95K по-високи от тези на $\text{Zr}_{(100-x)}\text{Cu}_x$. Вискозитетът в температурата на разстъкляване е между $2\text{E}+11$ и $2.7\text{E}+11\text{ Pa s}$.

Скоростта на охлаждане при втвърдяване на сплавите (скоростта на въртене на охлаждащия диск между 30 и 42m/s) не оказва съществено влияние върху изследваните тук свойства на сплавите.

Бинерни аморфни сплави $\text{Hf}_{(100-x)}\text{Cu}_x$ ($x=30$ и $40\text{ at.}\%$) притежават много висока механична якост ($\sigma_f = 1.88$ и 2.17 GPa), по-висока от тази на най-високояките стомани и отлична стъклообразуваща способност.

Отличните качества на изследваните аморфните $\text{Hf}_{(100-x)}\text{Cu}_x$ ($x=30$ и $40\text{ at.}\%$) сплави ги прави много перспективни, както от гледна точка на приложението им след консолидация на ленти от тях, така и за получаването им във вид на масивни аморфни слитъци.

(B26) Стоянова, Л., Фазакас, Е., Варга, Л. К, **Янкова, С.** и К. Русев¹ Термична устойчивост и вискозитет на бързозатвърдели аморфни сплави $\text{Al}_{85}\text{Ni}_5\text{Co}_2\text{RE}$ ($\text{RE}=\text{Gd}, \text{Ce}, \text{U}$), *Научни известия на НТС по Машиностроене*, година XVII, бр. 5 (115), 2010, стр.179 -185, 2010

Металните стъкла на основата на Al притежават отлични механични свойства. Тези метални стъкла обаче не се получават лесно, тъй като изискват висока скорост на бързо охлаждане. Най-голямата дебелина достигната до сега е около 0.5 mm (с Gd). За практически цели са необходими обемни сплави получени чрез консолидация на люспи или прахове получени чрез бърза закалка. Консолидацията (при горещо изостатично налягане или гореща екструзия) трябва да се провежда при температури доста по-ниски от тази на кристализация за да се избегне разстъкляването (кристализацията). Поради тези причини е интересно да се търсят богати на Al състави с добра стъклообразуваща способност (СОС) на стопилките и сравнително високи температури на кристализация и разстъкляване. Един подход за получаване на богати на Al аморфни сплави, които притежават добра стъклообразуваща способност и достатъчно висока термична устойчивост, е чрез легиране с метали от желязната група (Ni, Co) и редкоземни елементи (Gd, Ce, U).

Обект на публикация **(B26)** са изследвания на термичната устойчивост, вискозното поведение, стъклообразуващата способност и механичната якост на три лентовидни кватернерни сплави $\text{Al}_{85}\text{Ni}_5\text{Co}_2\text{RE}_8$ ($\text{RE}=\text{Gd}, \text{Ce}, \text{U}$). Изходните легатури са изготвени чрез индуктивно стапяне на чисти елементи във водоохлаждаема медна кокила под аргонова атмосфера. Около 10g от сплавите са затвърдени по метода Предене от стопилка върху охлаждащ диск (CBMS) под защитна аргонова атмосфера. Периферната скорост на охлаждащия диск е 40m/s . Аморфността на получените ленти е потвърдена чрез рентгенова дифракция (Brucker ASM 200) и диференциална сканираща калориметрия (Perkin Elmer DSC 2C).

Кристализационните характеристики - температури на начало и максимум на кристализация, енталпия на кристализация, температури на разстъкляване (от вискозните криви), индекс на крехкост на стопилките и вискозни характеристики на получените Al сплави са изследвани с помощта на диференциален сканиращ калориметър Perkin Elmer DSC 2C и кварцов дилатометър Perkin Elmer TMS 2. Забелязва се, че заместването на част от алуминия в бинерните сплави с комбинация от никел и кобалт повишава рязко термичната устойчивост (температурата T_{on}) на стъклата от 37 до 130K.

Изчислени са индексите на крехкост на стопилките m_A и якост на разрушаване σ_f на изследваните сплави. Може да се направи заключението, че две от сплавите $Al_{85}Ni_5Co_2RE_8$ ($RE = Ce, U$) имат нисък индекс на крехкост - 31 и 41, което показва че те могат да бъдат получени сравнително лесно в аморфно състояние. Изчислената якост на разрушаване има стойности сравними с тази на неръждаемите стомани.

Термичната устойчивост на изследваните кватернерни аморфни сплави на основата на алуминий $Al_{85}Ni_5Co_2RE_8$ ($RE = Gd, Ce, U$) е с до 140K по-висока от тази на бинерните $Al_{92}RE_8$ ($RE = Gd, Ce, U$). Температурите на начало на кристализация са 568K, 576K и 580K, съответно.

Температурите на стъклопреход на сплавите са 548K, 545K, 564K, а вискозитетът в температурата на разстъкляване е $2.6E10$, $1.5E11$ и $2.1E11$ Pa s, за $RE = Gd, Ce, U$ съответно.

Трите сплави $Al_{85}Ni_5Co_2RE_8$ ($RE = Gd, Ce, U$) притежават отлична механична якост ($\sigma_f = 1.3 \div 1.5$ GPa), сравнима с тази на неръждаемите стомани, а сплавите с Ce и U имат и много добра стъклообразуваща способност на стопилката ($m_A = 29 \div 38$).

Аморфните сплави $Al_{85}Ni_5Co_2RE_8$ ($RE = Ce, U$), поради отличните механични показатели, са интересни за получаване на изделия от тях чрез консолидация. Те са перспективни и за производство на масивни слитъци поради високата стъклообразуваща способност на стопилките им.

(C29). Светла Янкова, Структурна релаксация и кристализация на лентови аморфни и обемни нанокристални сплави на основата на металите желязо, кобалт, никел, мед и циркони, **Автореферат на Дисертационен труд за присъждане на ОНС Доктор, 2010**, Институт по металознание „Акад. А. Балевски” при Българска Академия на науките

(B27) Стоянова, Л., Янкова, С., Фазакас, Е., Варга, Л. К. и К. Русев, Термична устойчивост и механични свойства на някои аморфни сплави на основата на Al-U, *Научни известия на НТС по Машиностроене*, 2009

(B28) Стоянова, Л., Янкова, С., Фазакас, Е., Варга, Л. К. и К. Русев, Термично поведение на аморфни сплави $Al_{(100-x)}Y_x$, *Научни известия на НТС по Машиностроене*, 2009

Известни са редица мултикомпонентни масивни аморфни сплави с критична скорост на охлаждане от порядъка на 100 K/s и висока стъклообразуваща способност (COC). Това обстоятелство прави възможно преодоляването на основния недостатък на лентовидните аморфни метални сплави – тяхната много малка дебелина (от порядъка на 10-30 μm) при запазване на отличните им свойства. Значителни усилия се полагат и за получаване на термично по-устойчиви масивни сплави на основата на алуминий, поради сравнително ниското им относително тегло, чрез добавянето на високотопими елементи като Ta, Y, U и др.

В настоящето изследване е приложен метод за оценка на COC (чрез т.н. индекс на крехкост на стопилките) и на механичните свойства (якост на разрушаване) на масивни аморфни сплави на базата на експерименти върху аморфни метални лентови сплави, чието експериментално получаване е значително по-лесно от това на масивните. Този метод се базира на изследване на кристализационните и вискозни характеристики на сплавите с помощта на диференциална сканираща калориметрия и термомеханичен анализ на вискозното течение. Резултатите от подобно изследване дават възможност да се направи

предварителна оценка както за възможността за получаване на масивни аморфни сплави от дадена система, така и да се предвидят техните механични свойства.

Обект на публикации (B27) и (B28) са :

Термичната устойчивост на пет лентови бинерни аморфни сплави на основата на Al-U: Al_{92}U_8 , $\text{Al}_{90}\text{U}_{10}$, $\text{Al}_{90}\text{U}_5\text{Ni}_5$, $\text{Al}_{85}\text{U}_8\text{Ni}_5\text{Co}_2$, $\text{Al}_{85}\text{U}_5\text{Ni}_8\text{Co}_2$ и вискозното поведение на три от тях – $\text{Al}_{90}\text{U}_5\text{Ni}_5$, $\text{Al}_{85}\text{U}_8\text{Ni}_5\text{Co}_2$, $\text{Al}_{85}\text{U}_5\text{Ni}_8\text{Co}_2$. (B27) и термичната устойчивост на три лентови бинерни аморфни сплави $\text{Al}_{(100-x)}\text{Y}_x$ ($x=8,10,12$ ат.%) и вискозното поведение на една от тях – $\text{Al}_{88}\text{Y}_{12}$.(B28).

Температурите на начало на кристализация и разстъкляване са използвани за изчисляване на индекса на крехкост на стопилките, както и на якостта на разрушаване.

За изследваните сплави са получени температури на началото (T_{on}), на максимума (T_{max}), и енталпията (ΔH_{cr}) на кристализационния процес, както и определените от кристализационните криви температури на разстъкляване T_g^{DSC}

Измерени са температурни зависимости на вискозитета η на сплавите $\text{Al}_{90}\text{U}_5\text{Ni}_5$, $\text{Al}_{85}\text{U}_8\text{Ni}_5\text{Co}_2$, $\text{Al}_{85}\text{U}_5\text{Ni}_8\text{Co}_2$.

За всички сплави е изчислен индексът на крехкост на стопилката. Четири от изследваните сплави, а именно Al_{92}U_8 , $\text{Al}_{90}\text{U}_{10}$, $\text{Al}_{90}\text{U}_5\text{Ni}_5$ и $\text{Al}_{85}\text{U}_5\text{Ni}_8\text{Co}_2$ имат сравнително нисък индекс на крехкост на стопилките и могат да бъдат получени по-лесно в аморфно състояние. Най-ниска термична устойчивост има сплавта $\text{Al}_{90}\text{U}_5\text{Ni}_5$, а най-висока – $\text{Al}_{85}\text{U}_5\text{Ni}_8\text{Co}_2$. Две от сплавите – $\text{Al}_{85}\text{U}_8\text{Ni}_5\text{Co}_2$, $\text{Al}_{85}\text{U}_5\text{Ni}_8\text{Co}_2$ имат висока якост на разрушаване от порядъка на 1.5 GPa.

Особено перспективна, за производство на масивни слитъци, аморфна сплав се оказва $\text{Al}_{85}\text{U}_5\text{Ni}_8\text{Co}_2$. Тя притежава по-висока стъклообразуваща способност, която е съпроводена от висока якост на разрушаване.

Трите изследвани сплави $\text{Al}_{(100-x)}\text{Y}_x$ ($x=8,10,12$ ат.%) имат сравнително нисък индекс на крехкост на стопилките и могат да бъдат получени по-лесно в аморфно състояние. Увеличаването на съдържанието на Y в сплавите от 8 ат.% до 12 ат.% води до повишаване на термичната им устойчивост с около 100K (от $T_{on}=399\text{K}$ до $T_{on}=497\text{K}$) и респективно до повишаване на предвидимата якост на разрушаване от 0.4 GPa до 0.9 GPa. За сравнение някои аморфни сплави на основата на Al имат якост на разрушаване около 1.5 GPa. Следователно, за постигането на такива високи показатели към бинерната сплав $\text{Al}_{88}\text{Y}_{12}$ е необходимо да се търсят и добавят и други легиращи елементи и да се експериментира в посока създаване на многокомпонентни сплави.

(С34) СтояноваЛ. , С Янкова, К. Русев, Кинетика на сумарната кристализация на обемната аморфна сплав $\text{Pd}_{40}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_{10}\text{P}_{20}$ в неизотермични условия, „Машины, технологии, материали” MTM 2006 (2006) стр. 91-94

Представени са резултатите от проведените изследвания върху сумарната обемна кристализация в обемната аморфна метална сплав $\text{Pd}_{40}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_{10}\text{P}_{20}$. Легатурата на сплавта $\text{Pd}_{40}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_{10}\text{P}_{20}$ беше получена от сплавяването на мед и паладий с чистота 99.999 и интерметалните съединения Ni_2P и Pd_7P_3 в индукционна пещ чрез използване на BN тигел. Аморфните обемни проби от $\text{Pd}_{40}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_{10}\text{P}_{20}$ са получавани във вид на цилиндри с дължина 70 mm и диаметър 5 mm чрез закаляване във вода на стопилка в кварцови капиляри.

От тези цилиндри са изрязвани с диамантен диск шайби с дебелина около $0.15 \div 0.20$ mm и тегло $40 \div 60$ mg. Аморфната и кристална структура на всички проби е изследвана с рентгенова дифракция с дифрактометър Siemens D5005. Всички изследвани проби са рентгенографски аморфни.

Изотермичното кристализационно поведение на аморфната $\text{Pd}_{40}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_{10}\text{P}_{20}$ сплав беше изследвано с помощта на диференциален сканиращ калориметър Perkin Elmer DSC 2C съответно при 610, 615, 620 и 630K. Тези изследвания показват, че кристализацията протича като едностадийен процес.

Показано е развитието на микроструктурата на изследваната сплав след отгряване при 610 K за времена съответно 30, 60, 75 и 152 min. Както се вижда, обемната част на кристализираните области постепенно нараства с увеличаване на времето на изотермично отгряване. След отгряване в продължение на 152 min цялата проба е практически напълно кристализирала.

Активните за зародишообразуване и кристален растеж в масивната $\text{Pd}_{40}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_{10}\text{P}_{20}$ аморфна метална сплав са равнините на срязване на пробите с диамантен циркуляр и повърхностите на леярските всмукнатини.

Кристалните области възникнали при кристализацията в температурния интервал 590 – 620 K са съставени от интерметално съединение и или/ клетъчни дендритни отделения от евтектичен тип.

Линейните скорости на растеж в масивната аморфна $\text{Pd}_{40}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_{10}\text{P}_{20}$ метална сплав в температурния интервал 590-620 K варират от 1×10^{-10} до 1×10^{-8} m/s. Температурната зависимост на линейната скорост на кристален растеж в аморфната сплав $\text{Pd}_{40}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_{10}\text{P}_{20}$ може успешно да бъде описана от приближението на Uhlman при използването на температурната зависимост на вискозитета, определена експериментално.

Заклучения:

За пръв път е получена *обемна паладиева метална аморфна сплав* $\text{Pd}_{40}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_{10}\text{P}_{20}$ с ниска скорост на охлаждане /под 10^3K/s / съвместно с изследователи от Кралската фондация за научни изследвания, Холандия, с което са поставени основите на Направлението по аморфни метални сплави в България. Определени са специфичните характеристики на тази сплав, както и на четири други групи *лентови аморфни метални сплави* /общо 13 – $\text{Hf}_{(100-x)}\text{Cu}_x$ ($x = 30$ и $40 \text{ at.}\%$), $\text{Al}_{85}\text{Ni}_5\text{Co}_2\text{RE}_8$ ($\text{RE} = \text{Gd}, \text{Ce}, \text{U}$), Al-Y и Al-U /, получени в Централния институт по физика на Унгарската академия на науките и изследвани в България. У нас е установена стъклообразуващата способност на посочените сплави и е определен пълният комплекс на характеристиките им: якост на разрушаване; термичната устойчивост; вискозно поведение; температура на стъклопрехода, вискозитет при тази температура.

III-2. Изследване на механичните показатели на ортодонтски дъги в реални условия.

В ортодонтската практика за лечение се използват метални ортодонтски дъги, които в устната кухина се намират под влияние на променливи натоварвания в комбинация с неблагоприятна среда. Това предполага промяна в структурата и във физико-механичните им свойства по време на използването им за ортодонтско лечение, в резултат на което използваната ортодонтска дъга загубва първоначалните си свойства и ефективност, което често е причина за внезапното счупване на дъгата и нежелано забавяне на лечението.

Най-благоприятният материал за направа на брекети и ортодонтски дъги е онзи, който е в състояние от една страна да издържи на екстремните условия, които се срещат в устата на пациентите, да притежава физико-механични свойства, позволяващи деликатно, но и ефективно преместване на зъбите на пациента и от друга да бъде биосъвместим и неувруждащ пациента.

За анализиране на промените в най-използваните в ортодонтията сплави се използват стандартни *in-vitro* и *in-vivo* методики и изследвания. В научните среди, все по-често се прилагат *in-vivo* изследванията, даващи реална представа за настъпилите промени в състава, структурата и свойствата на ортодонтските дъги след различен реален период на използване при лечение. Освен това, *in-vivo* техниките са по-лесни за изпълнение и с по-ниска цена.

Този подход, да се изпитват и охарактеризират използвани ортодонтски дъги, непосредствено след отстраняването им от устата на пациента, предоставя съвсем нова информация за: промените в повърхностния профил на дъгите, последствията от атаките на специфични микробни видове върху ортодонтските материали, промяната в химичния състав

на използвания материал, структурните промени в материала, промяната на неговите физико-механични свойства с течение на времето на използване в устната кухина в условия на променливи натоварвания и корозионна среда.

(B12) Йорданова Р. М., В. Г. Петров, А. Стоянова-Иванова, В. Микли, Св. Р. Янкова, Л. С. Андреева, Д. Г. Ангелова, Изследване на химичния състав и механичните свойства на ортодонтски дъги в зависимост от периода на ортодонтско лечение, Научни известия на НТСМ (ISSN 1310-3946), Година XXIII, бр. 2(165), юни 2015, стр. 230-234

(B13) Петрунов В., Р. Йорданова, В. Микли, Д. Ангелова, А. Иванова –Стоянова, С. Янкова, Изследване на повърхностните характеристики на огънати титан-молибденови ортодонтски дъги, Научни известия на НТСМ (ISSN 1310-3946), Година XXIII, бр. 2(165), юни 2015, стр. 235-239

В **(B12)** обект на изследването са фабрични ортодонтски дъги от корозионноустойчива аустенитна стомана AISI 304 (1,4301). Направена е пълна характеристика на неизползвани и използвани при лечение за различен период от време фабрични ортодонтски дъги.

Изследвани са промяната в химичния състав, структурата на повърхността и механичните свойства на корозионноустойчивата стомана, от която са изработени ортодонтските дъги, в резултат на различния период на използване при реално лечение на пациенти.

Препоръчва се престоят на дъгата в устата на пациента да е максимум 10 седмици.

Установени са якостните и пластични показатели на изследваните ортодонтски дъги преди и след различен период на лечение. Препоръчително е дъгите от изследваната стомана да се използват до 10-та седмица от лечението, т.к. е установено, че след този период пластичните свойства на стоманата рязко намаляват, респективно увеличава се якостта им, като след 20 седмица на употреба, дъгите загубват окончателно качеството си, а от там и функционалността и ефективността си.

Сравнени са механичните свойства на дъги, разположени в горна и долна челюст на пациентите. Установено е, че дъгите разположени в долна челюст загубват по-рано качествата си в сравнение с дъгите поставени на горна челюст.

Познаването на връзката състав-структура-свойства за материалите, от които се изработват ортодонтските дъги, е мощен инструмент за правилен избор от ортодонта на дъга, както и на избор на продължителност на престой в устата при лечение. Правилното използване на подходящи дъги при ортодонтско лечение, отчитайки времето, през което дъгите запазват качеството си и спецификата на конкретното лечение и индивидуалността на пациента, е гаранция за ефективността от лечението, което е важно както за пациента, така и за лекувания го ортодонт.

В публикацията **(B13)** са изследвани титан-молибденови ортодонтски дъги с напречно сечение 0,43x0,635mm, произведени от OrthoOrganizer Inc. Титан-молибденовите ортодонтски дъги притежават изключително желани от ортодонтите свойства: голям пружиниращ ефект; ниска твърдост, която е с 40% по-малка, от тази на най-често използваните дъги от корозионноустойчиви стомани ; относително грапава повърхност, която улеснява задържането в брекета или студеното заваряване на елементите; лесно се огъват и запояват, като не трябва да се допуска прекалено нагряване, т.к. високата температура променя свойствата на дъгата и тя става по-гъвкава на мястото на спойката ; добра корозионна устойчивост, подобна на тази на стоманените и кобалт-хромовите дъги . Изследвани са повърхностните характеристики на фабрично и ръчно направени гъбообразни извивки (mashroom loop) по дължина на ТМА дъгата. Ръчно изработените извивки са направени чрез огъване под 90° с обло и четвъртото рамо на ортодонтски клещи.

Проведени са СЕМ изследвания на повърхностите на дъгата в местата на огъване на фабричните и ръчно направените извивки. Наблюдавани са натискови и опънови зони с различна степен на деформация в различните части от гъбообразната извивка (точки). Установено е, че най-опасни са местата, в които дъгата е извита под 90° .

Направен е сравнителен анализ на повърхността на фабрично направените извивки с тези направени на ръка от ортодонта. Установено е, че в повърхностните характеристики на дъгата в местата на огъване има незначителна разлика между ръчно направените и фабричните извивки. Установено е, че в натисковите области на ръчно направените извивки се наблюдават по-големи повърхностни изменения в сравнение с тези при фабричните извивки, а в опъновите – обратно, в резултат на по-бавната деформация (огъване). Установеното е в полза за ортодонтите, т.к. ръчно направените извивки не влошават качествата на дъгата и този подход може успешно да се прилага с цел намаляване на стойността на лечението при запазване на неговата ефективност.