

ISSN 1311-3321

**РУСЕНСКИ УНИВЕРСИТЕТ „Ангел Кънчев“
UNIVERSITY OF RUSE „Angel Kanchev“**

Факултет „Машинно-технологичен“
Faculty of Mechanical and Manufacturing Engineering

СБОРНИК ДОКЛАДИ
на
СТУДЕНТСКА НАУЧНА СЕСИЯ – СНС'11

СБОРНИК ДОКЛАДОВ
СТУДЕНЧЕСКОЙ НАУЧНОЙ СЕСИИ – СНС'11

PROCEEDINGS
of
the SCIENTIFIC STUDENT SESSION – SSS'11

Русе
Ruse
2011

Сборникът включва докладите, изнесени на студентската научна сесия **CHC'11**, организирана и проведена във факултет “**Машинно-технологичен**” на Русенския университет “Ангел Кънчев”.

Докладите са отпечатани във вида, предоставен от авторите им.

Доклады опубликованы в виде, предоставленном их авторами.

The papers have been printed as presented by the authors.

ISSN 1311-3321

Copyright ©

♦ СТУДЕНТСКАТА НАУЧНА СЕСИЯ се организира от АКАДЕМИЧНОТО РЪКОВОДСТВО и СТУДЕНТСКИЯ СЪВЕТ на РУСЕНСКИЯ УНИВЕРСИТЕТ (РУ) с цел да се предостави възможност на студенти и докторанти да популяризират основните резултати от своята учебно-изследователска работа и да обменят опит.

♦ ОРГАНИЗАЦИОНЕН КОМИТЕТ:

• Съпредседатели:

проф. д.т.н. Христо Белоев – РЕКТОР на РУ
Александър Стойчев – ПРЕДСЕДАТЕЛ на СС

• Научни секретари:

доц. д-р Ангел Смрикаров – Заместник-ректор на РУ
ASmrikarov@uni-ruse.bg

Мирослав Петков – Заместник-председател на СС
mirko_b88@abv.bg

• Членове:

Факултет „Аграрно индустриален”

доц. д-р Чавдар Везиров
vezirov@uni-ruse.bg
Цветелина Василева
cvele@abv.bg

Факултет „Машинно технологичен”

доц. д-р Стоян Стоянов
sgstoyanov@uni-ruse.bg
Виктория Каракорова
Vickie_best@abv.bg

Факултет „Електротехника, електроника, автоматика”

доц. д-р Русин Цонев
rtzonev@uni-ruse.bg
Филип Трифонов
filman@abv.bg

Факултет „Транспортен”

доц. д-р Валентин Иванов
vdivanov@uni-ruse.bg
Павел Павлов
pawel_pavlov@abv.bg

Факултет “Бизнес и мениджмънт”

доц. д-р Юлиана Попова
jppropova@uni-ruse.bg
Виктория Ангелова
viktoriya.angelova88@gmail.com

Факултет „Юридически”

гл.ас. Боряна Милкова
b.milkova@mail.bg
Миглена Marinova
megt90@abv.bg

Факултет „Природни науки и образование”

доц. д-р Петър Сигалов
sigalov@ami.uni-ruse.bg
Благовест Николов
blago_nikolov_86@abv.bg

Факултет „Обществено здраве”

гл.ас. д-р Стефан Янев
janeb_bg@yahoo.com
Александър Атанасов
raceface@abv.bg

Филиал Разград

гл.ас. д-р Цветан Димитров
tz_dimitrow@abv.bg
Деница Бонева
deni4ka_boneva@abv.bg

Филиал Силистра

гл.ас. Галина Лечева
lina_acad.bg@abv.bg
Александър Господинов
lordsweet@mail.bg

СЪДЪРЖАНИЕ

1.	Автоматична диагностика на геометричната точност на обработващ център MC032 чрез координатни измервания	7
	Виктория Каракорова	
	Научен ръководител: гл.ас. Димитър Димитров	
2.	Приложение на CAD/CAM системите за автоматизирано технологично проектиране на детайли с профилни повърхнини (по задание)	12
	Искра Малчева	
	Научен ръководител: гл.ас. Иво Атанасов	
3.	Изследване на конструктивни детайли по метода на крайните елементи в системата COSMOS Works	17
	Николай Станков	
	Научен ръководител: д-р Александър Иванов	
4.	Метод за определяне на отклонението от форма без използване на специално оборудуване	23
	Айдън Ахмедов	
	Научен ръководител: д-р Данко Тонев	
5.	Многокритериална оптимизация по метода PSIMS с непрекъснато и дискретно изменящи се параметри.....	28
	Пънфей Джоу	
	Научен ръководител: д-р Велина Боздуганова	
6.	Извеждане на косоъгълен краен елемент	36
	Ваня Василева	
	Научен ръководител: ас. Иво Драганов	
7.	Анализ на товароносимостта на остьклени конструкции със стъклени ребра	42
	Нели Стойкова	
	Научен ръководител: ст. ас. Димитър Велчев	
8.	Якостно и деформационно пресмятане на остьклена скелетна фасадна стена	50
	Владимир Тотев	
	Научен ръководител: ст. ас. Димитър Велчев	
9.	Получаване на ултрайдисперсно-структурни технически чист алюминий и изследване на механичните му свойства	58
	Мариета Станоева	
	Научен ръководител: доц. Росен Радев	
10.	Корозионно-защитни свойства на многослойни покрития Cr-Cr-N/Cr върху стомана X12M.....	65
	Анелия Димитрова	
	Научен ръководител: доц. Диана Цанева	

11.	Магнетронно отложени еднослойни TiN покрития върху стомана 9ХС при температура на подложката Тп = 100 °C без термично и ионно почистване.....	71
	Любомир Георгиев	
	Научни ръководители: доц. Иван Дерменджиев, д-р Ваня Захариева	
12.	Разработване на мултимедийно пособие за онагледяване на лабораторни упражнения по дисциплината „Термична обработка на материалите”	77
	Моника Кулева	
	Научен ръководител: гл.ас. Данаил Господинов	
13.	Вакуумно оксикарбонитрирани галванични покрития от желязо и хром върху подложка от нисковъглеродна стомана и армко желязо	82
	Снежанка Димитрова	
	Научен ръководител: проф. Пламен Данев	
14.	Вакуумно оксикарбонитриране на различно структурирано електролитно желязо върху подложка от армко желязо.....	87
	Юлияна Ганчева	
	Научен ръководител: ас. Мария Николова	
15.	Сравняване на оптичните свойства на графенови и ITO слоеве	92
	Марина Иванова	
	Научен ръководител: доц. Първолетка Дочева	

Автоматична диагностика на геометричната точност на обработващ център МС 032 чрез координатни измервания

автор: инж. Виктория Каракорова
научен ръководител: гл.ас. Димитър Димитров

Abstract: Automatic diagnosis of geometric precision on machining center MC 032 by coordinate measurements. The Accuracy of machining of parts depends and from the geometric accuracy of the machines. Later in time it changes depending on many factors, which it operate. It is therefore necessary diagnosis of geometric precision.

It can be done by 3D touch probe. This method is a quick, cheap and sufficiently accurate solution on the problem.

Key words: diagnosis,geometric precision,3D touch probe

1. Състояние на проблема.

Приоритетна цел при разработване на технологичен процес за изработване на детайл в условията на общото машиностроение е осигуряване на изискванията за точност на детайла, които от своя страна в значителна степен зависят от геометричната точност на използваните металорежещи машини (МРМ).

Следователно за целите на технологичното проектиране е необходимо да се разполага с данни за текущото състояние на геометричната точност на машината. Това условие, имайки предвид значението в най-голяма степен МРМ с цифрово-програмно управление (ЦПУ).

Съгласно [1] БДС е въведена класификация, която обособява четири основни групи фактори за оценка на геометричната точност на машините:

- Точност на формата на базови повърхнини;
- Точност на взаимното разположение на повърхнини и оси;
- Точност на траекторията на движение;
- Точност на машината при работа по програма.

Възникващата в резултат на отклоненията от геометрична точност на машината грешка може да се представи като сумарна грешка, включваща случаини, постоянни и законопроменливи съставни.

Установявянето на отделните компоненти на сумарната грешка, тяхната големина и посока е основание да бъде взето едно от следните решения:

- отклоненията от геометрична точност са в допустимите граници;
 - необходим е ремонт или настройване и регулиране на определени детайли и възли на МРМ;
- въвежда се при възможност компенсация на грешките чрез системата за ЦПУ;
- въвежда се компенсация в обработващите NC програми с помощта на външни компютърни системи за автоматизираното им съставяне.

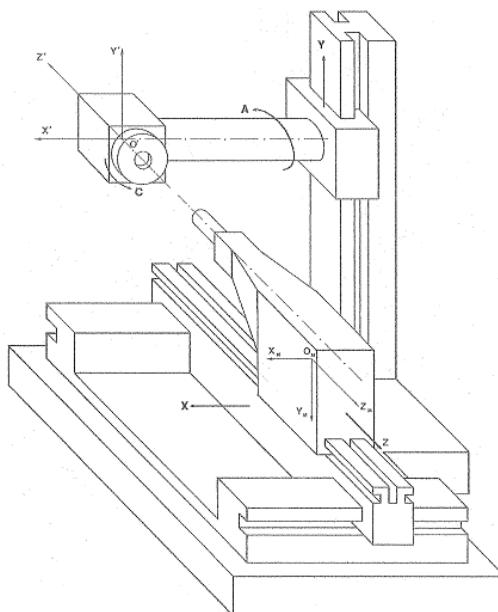
За различните видове МРМ с цифрово-програмно управление (ЦПУ) са разработени методики за проверка на геометричната им точност [4]. Но тяхното реализиране изисква квалифицирани изпълнители и е свързано с използването на специална екипировка (еталони), измервателни средства и продължителни процедури. Поради това те са подходящи за приложение единствено в завода производител на МРМ и при първоначално въвеждане в експлоатация на машината. А в производствени условия се контролират само някои от възникващите хлабини, износване и топлинни деформации на отделни възли на машината.

Най-сложно е решението за многооперационни пробивно-фрезови машини, тип обработащ център, които са с повече от три работни оси, тъй като получаваните грешки в точността на обработване на детайла са функция от сложната конструкция на машината и в резултат е възможно една и съща отчетена грешка в точността на детайла да се дължи на различни отклонения от геометричната точност на машината.

С навлизането в технологичната практика на контактните координатни измервания върху МРМ с ЦПУ с помощта на трикоординатна измервателна глава (ТИГ) има възможност за автоматизиран, достатъчно точен, производителен, евтин периодичен контрол на някои от елементите на геометричната точност [4].

Инструменталният обработващ център MC 032 представява подходящ пример за разглеждания въпрос [3].

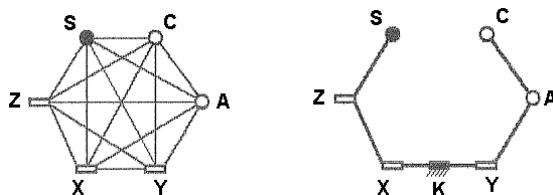
Работните оси на машината са пет. Линейните са X,Y,Z, ротационните са C A, а конструкцията на машината позволява достъп на режещите инструменти до всички повърхности на обработвания детайл, без базовите.



Фиг.1 Конструкция на обработващ център MC 032

В случая отклоненията от точността на обработване се дължат на грешката във взаимното разположение на режещия инструмент (оста на вретеното) и детайла (маса C)[3]. В зависимост от вида на използвания инструмент, обработваната повърхнина, начина на нейното обработване и съществуващи отклонения от геометричната точност на машината се получават съответните грешки.

Тяхната взаимна връзка може да бъде представена графично:



Фиг.2 Схема на отклоненията на взаимното разположение на осите.

$$C_6^2 = \frac{6!}{2!(6-2)!} = 15$$

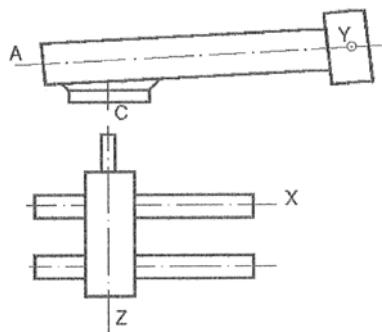
При измерване на отклонения от взаимното разположение на равнини и оси, чрез координатни измервания на детайл - еталон, когато ТИГ е установена във вретеното, а еталонния детайл - на масата, измерваното отклонение ще е между вретеното и масата - т.е. на точността на измерването ще влияят всичките шест основни отклонения [3]. Това изиска подходящ алгоритъм за тяхното измерване, така че да бъде избегнато взаимното им влияние :

А.Проверка на отклоненията при позициониране на всичките пет оси [2].

Б.Проверка на успоредността на равнината на масата на ос Y при позициониране по ос A=0°. При установяване на отклонение се внася корекция в параметъра, задаващ координатната система спрямо „опорна точка”.

В.Проверка на успоредността на равнината на маса С и ос X при позиция на ос A=0°. При установена неуспоредност се извършва завъртане на направляващите на Y около ос Y на установения ъгъл, така че масата да заеме успоредно на ос X положение (фиг.3). Трябва да се има предвид, че постигнатата успоредност се гарантира само за положението съответстващо на фиг.3 (A=0°).

На последващите координатни измервания този ъгъл няма да оказва влияние, тъй като големината му ще е известна.



Фиг.3 Постигане на успоредност на маса С спрямо ос X чрез завъртане на направляващите по Y около ос Y.

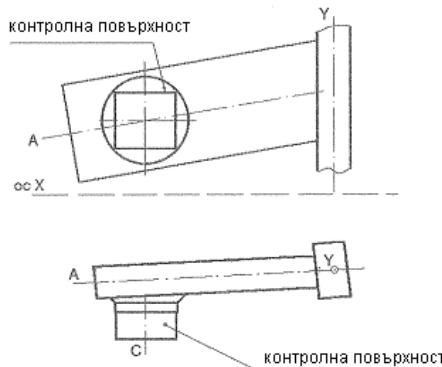
Г.Проверка за успоредността на контролната повърхност на еталонния детайл спрямо ос X, при позиция на ос A=0°. При установяване на отклонение се внася корекция чрез ротация по С (фиг.4).

Д.Проверка за отклонение от перпендикулярност във взаимното разположение на трите линейни оси.

Д.1.Проверка за отклонение от перпендикулярност във взаимното разположение на оси X и Z. Извършва се като се измерят координатите на 2 точки от еталонен детайл, с формата на куб (фиг.6).

Разликите между координатите им измерени по направления X и Z - съответно ΔX и ΔZ определят тъгъла a_{xz} между осите X и Z :

$$\alpha_{xz} = \arccos \frac{\Delta X}{\Delta Z}$$

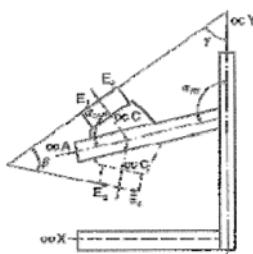


Фиг.4 Постигане на успоредност на контролната повърхност на еталона и ос X чрез ротация по ос C.

Д.2.Проверка за отклонение от перпендикулярност във взаимното разположение на оси X и Y. Схемата на измерване е аналогична на тази при проверка на отклонението от перпендикулярност между оси X и Z .

Д.3.Проверка за отклонение от перпендикулярност във взаимното разположение на оси Y и Z.

$$\alpha_{yz} = 90^\circ - \frac{\beta}{2}$$

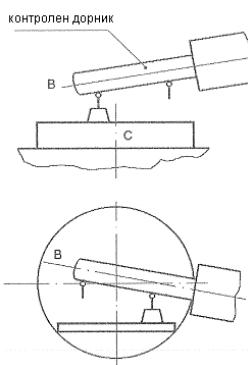


Фиг.5 Пинципна схема за измерване на отклонението от перпендикулярност между оси C и A.

Ж. Определяне на отклонението от перпендикулярност във взаимното разположение на оси A и Y. Ъгълът между правата $E_1 E_2$ и ос Y може да се изчисли, вземайки под внимание неперпендикулярността между оси X и Y. От четириъгълника, описан от оси C, A, Y и правата $E_1 E_2$ може да се пресметне ъгълът α_{AY} между правите Y и A, проектирани в равнината OXY (фиг.5):

$$\alpha_{AY} = 90^\circ + \alpha_{CA} - \gamma$$

3. Проверка за отклонение от успоредност между оста на вретеното и ос Z. За да се изчислят големината и посоката на това отклонение, е необходимо във вретеното да се установи контролен дорник, а ТИГ - на масата (фиг.6).



Фиг.6 Принципна схема за измерване на отклонението от успоредността между оста на вретеното и ос Z.

Чрез измерване на координатите на 2 точки в равнината OXZ и на други 2 в равнината OYZ и вземайки под внимание радиалното биене на дорника и отклоненията от перпендикулярност между осите X, Y и Z. може да се изчислят големината и посоката на отклонението от успоредност между оста на вретеното и ос Z.

Литература

- [1].БДС 2196-83. Общи изисквания към изпитванията на точност.
- [2].БДС 14632-88. Методи за проверка на точността на позициониране.
- [3].Тошев И., Тужарова Л., Енчев П. Изпитване и изследване на металорежещи машини. С. Техника. 1990.
- [4].Fanuc System 6M – model B. Maintenance Manual. 1981.

За контакти:

инж. Виктория Веселинова Каракорова, email:vickie_best@abv.bg

Приложение на CAD/CAM системите за автоматизирано технологично проектиране на детайли с профилни повърхнини (по задание)

автор: Искра Малчева
научен ръководител: гл.ас.инж. Иво Атанасов

В доклада е разгледана програмната връзка между CAD системата SolidWorks 2009 EE и CAM системата FeatureCAM 2009. Проследени са основните етапи на процеса на преработване на информацията с цел автоматизирано конструкторско и технологично проектиране на съдържанието на операция върху металорежеща машина с ЦПУ. Разгледани са детайли със сложни профилни повърхнини, зададени по различен начин: чрез 3D модел примитив, комбинирано задаване на геометрия чрез дискретни точки (начин, подходящ за сплайново моделиране), комбинации с повтарящи се геометрични подобекти и др.

Key words: CAD/CAM Systems, SolidWorks, FeatureCAM

ВЪВЕДЕНИЕ

Вече едва ли има проектанти, които не използват CAD/CAM системите. Те намират все по-широко приложение в почти всички области на проектантската работа. Абревиатурите гласят Computer Aided Design и Computer Aided Manufacture. Това накратко означава, че с помощта на компютри и специализиран софтуер се правят проекти за конструиране на различни по предназначение детайли и възли и в производството, с прякото участие на оборудване с ЦПУ – стругове, фрези, обработващи центри и др.

CAD/CAM комбинациите са достатъчно много, но еденици са тези, които са напълно съвместими. Една такава е CAD системата SolidWorks и CAM разработката FeatureCAM. Факта, че разработчиците DSystems и DelCAM са златни партньори, говори за пълна съвместимост на файловите им формати – 3D модел *.SldPrt и CAM файла *.FM.

ИЗЛОЖЕНИЕ

В CAD/CAM комбинация преработването на информацията е според блок-схемата, показана на фиг.1.

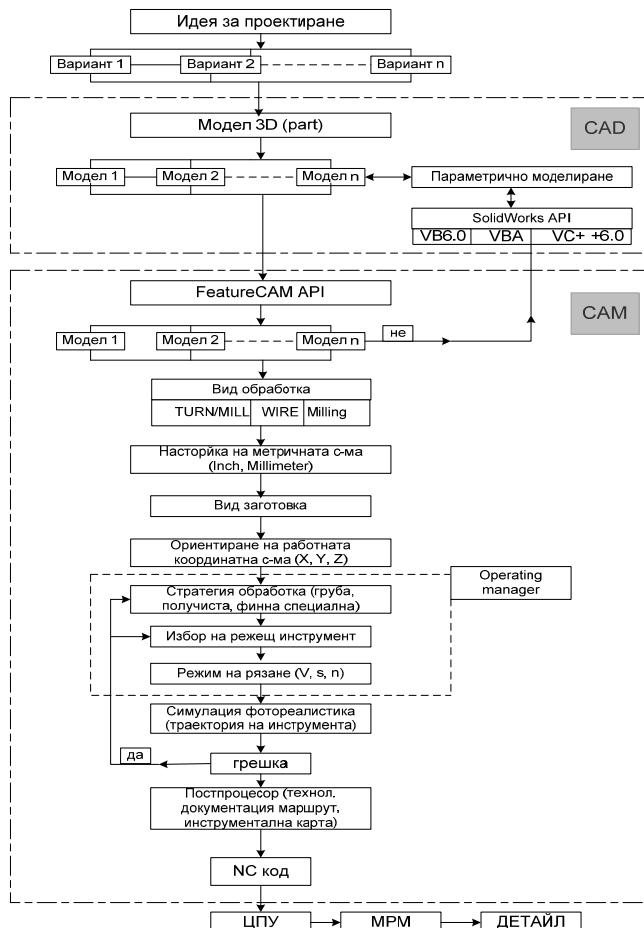
По принципа на детерминизация на задачите, основна цел на CAD система е създаването на 3D модел на детайла за конструктивно проектиране. При типово проектиране е предвидена възможност за параметрично модеклиране, използвайки вградения програмен интерфейс (API), който е софтуерен инструментариум, вграден в CAD системата SolidWorks.

Връзката с CAM разработката FeatureCAM е чрез Import на модела. Там също така е възможна API логика, която е в пряка връзка с CAD, и при наличие на пропуск или грешно моделиране, отново може да се върнем в тази среда.

Следват последователни диалози за:

- вид на механичната обработка, в зависимост от вида на модела, в случая – модул FeatureMILL;
- задаване на вида на метричната система – в случая в mm;
- диалог за вида на заготовката, параметри, обработваем материал и неговите механични характеристики;
- ориентация на работката координатна система спрямо повърхнините на 3D модела.

Следва основната задача на автоматизираното технологично проектиране, а именно определянето на последователността на технологичните преходи в операцията, т.е. формирането на Operating manager.



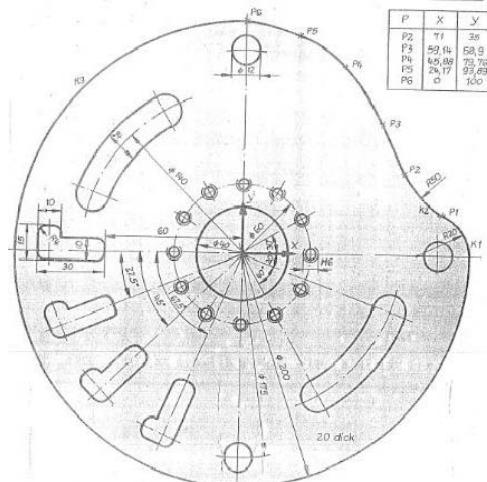
Фиг.1. Обобщена блок-схема на преработване на информацията в CAD/CAM

Идеята, показана на фиг.1 може да се демонстрира с примерните детайли, условно наречени детайл 1 – профилна гърбица (фиг.2) и детайл 2 (фиг.3) – тристиъпален управляващ профилно гърбичен детайл.

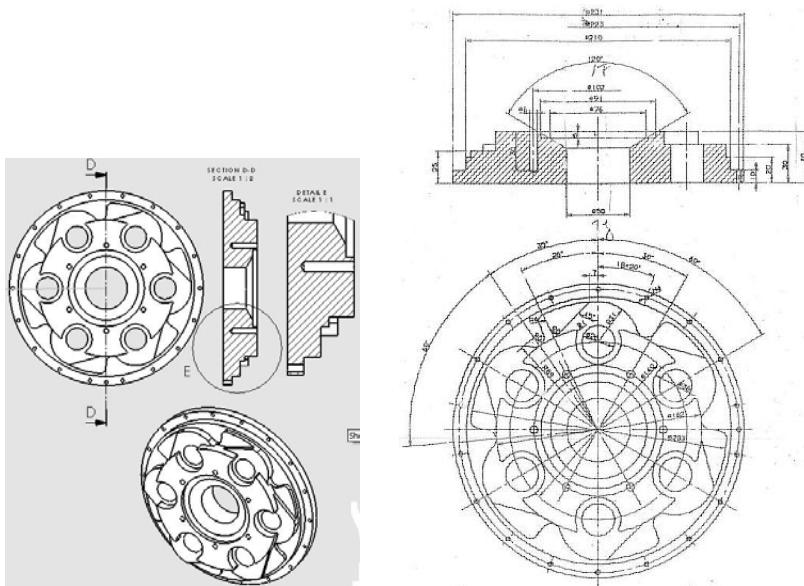
Предвидена е и възможността за параметрично конструктивно и технологично проектиране с приложение на вградените приложни програмни инструментариуми – API, които за CAD средата SolidWorks могат да се прилагат с различни алгоритмични езици – VB6.0, VBA и VC++ 6.0. Този подход е в пряка връзка с CAM приложението FeatureCAM API, използвайки се за директен трансфер на променлива геометрична информация без приложение на функцията Import при начало на работа с CAM средата FeatureCAM.

Конструктивно детайл 1 е характерен с това, че гърбичният му профил е зададен координатно чрез таблица с дискретни точки – $P_1 \dots P_6$, които в CAD средата SolidWorks се задават като сплайнова крива – spline 1, която е тангентираща до

точки на профила от дъга K1, с $R=20$ mm, и координатната точка (0,100), която е означена като P_6 в таблицата. Между дъгата K_1 и сплайна SP_1 има преход с радиус R 50. Дебелината на гърбичният профил е 20 mm.



Фиг.2. Работен чертеж на детайл 1.

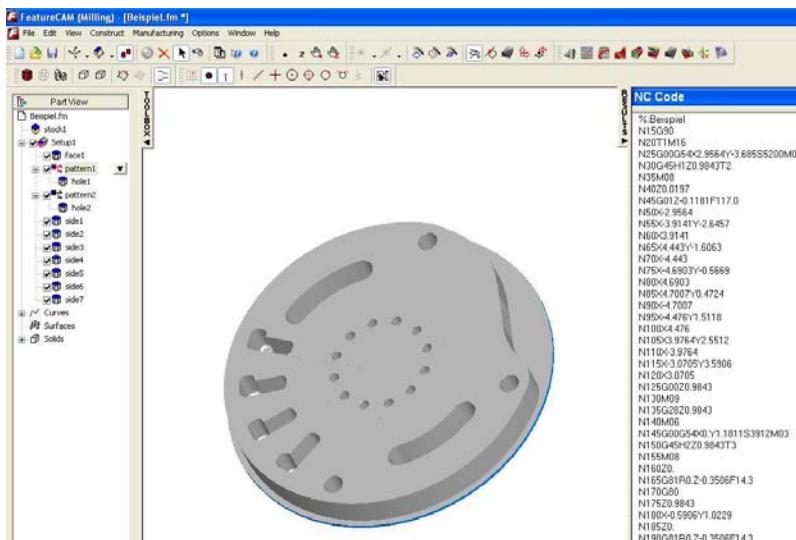


Фиг.3. Работен чертеж на детайл 2.

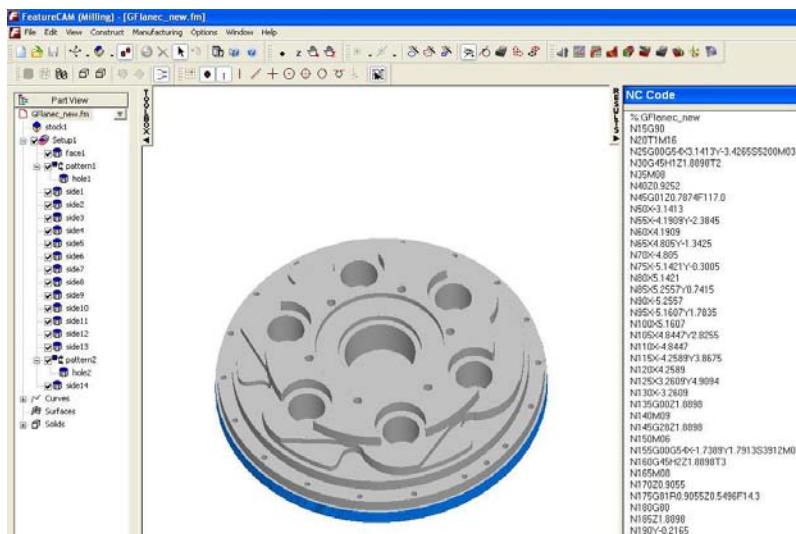
Детайл 2 е комбинативно съставен от три профилни контура.

При работата в среда SolidWorks е приложима команда Circular Pattern за кръгово размножаване на затворен контур п пъти равномерно около ос.

На фиг.4. е показан крайният резултат от автоматизираното технологично проектиране в среда FeatureCAM за детайл 1.



Фиг.4. Детайл 1. в CAM среда FeatureCAM



Фиг.5. Детайл 2. в CAM среда FeatureCAM

При автоматизираното технологично проектиране на детайл 2. е използвана възможността за разпознаване на геометрията на 3D модела с приложение на мощната функция Automatic Feature Recognition (AFR). Потребителят е в състояние

за активна намеса, ако се налага промяна при избора на режещ инструмент – пластина и държач, корекция на режимите на рязане, промяна на технологичната стратегия и др.

На фиг.5. е детайл 2. с показани меню прозорци Toolbox - Part View за последователността на повърхнините на обработка, данните за избраната заготовка, използвани Curve, Surface и Solid елементи. Налице е и Results с прозорец NC Code, където в текстов вид е показана част от управляващата програма за механична обработка на детайла, която е в текстов вид, като е налице възможността за активна корекция при нужда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- CAD/CAM комбинацията SolidWorks – FeatureCAM версии 2009 е рационално решение за автоматизирано технологично проектиране на детайли със сложнопрофилни повърхнини;
- Крайният резултат е верен NC-код, тестван чрез симулация, което е особено важно при по-сложни програми за обработващи центри с ЦПУ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Д.Донков – CAD/CAM системи в машиностроенето, Автоматизация на технологичното проектиране, част 1 и 2, Унив. изд-во “В.Априлов”, ТУ – Габрово, 1999, 2002.
- [2] Каравасилев О., Василев К., Атанасов И. – FeatureCAM – учебно пособие, част 1, Изздание Технологика, 2009.
- [3] www.featurecam.com
- [4] www.solidworks.com
- [5] www.ditra.bg

За контакти:

Искра Малчева, специалност “Индустриално инженерство”, МТФ, Русенски университет “Ангел Кънчев”, тел. 0883 54 69 29, e-Mail: iskra_malcheva@abv.bg
гл.ас.инж. Иво Атанасов, катедра “ТММРМ”, МТФ, Русенски университет “Ангел Кънчев”, тел.: 082 888 469, e-mail: iatanasov@uni-ruse.bg

Изследване на конструктивни детайли по метода на крайните елементи в системата COSMOSWorks

маг. инж. Николай Станков, д-р инж. Александър Иванов

Резюме: Разгледано е моделирането на конструктивни детайли и натоварване им в системата COSMOSWorks. Определени са големината и разпределението на отделните компоненти на напреженията за приемата координатна система, главните напрежения и еквивалентните напрежение на Фон Мизес за пластични материали.

Ключови думи: Метод на крайните елементи, моделиране, напрежения.

Abstract: In this paper the 3D modeling of a constructive parts and their loading in the COSMOSWorks system are examined. The size and distribution of the individual components of the stresses according to adopted coordinate system, the principal stresses and the equivalent Von Mises stresses for plastic materials are defined.

Key words: Finite elements method, modeling, stresses.

ВЪВЕДЕНИЕ

Методът на крайните елементи се използва като универсално средство за пресмятания и анализ на поведението на детайли и конструкции, които са подложени на силови и топлинни натоварвания [1, 2, 5].

Основното при този метод е, че непрекъснатата еластична структура на изследвания обект се разделя на краен брой малки дискретни елементи с прости геометрични форми, свързани един с друг във възлови точки разположени по границите им. Преместванията на тези възлови точки под въздействието на натоварванията приложени в тях, са неизвестни променливи в система от уравнения, решението на които представя поведението на цялата конструкция.

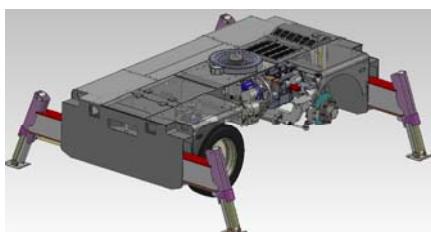
Чрез метода на крайните елементи се определят напреженията и деформациите в опасните сечения, което дава възможност да се направи якостна и деформационна проверка на дадения детайл или конструкция.

Използвайки съвременните програми, работещи по метода на крайните елементи, значително се намалява времето за анализ и оптимизация на изследваните обекти. Такава е и системата COSMOSWorks, която е интегрирана в CAD системата SolidWorks.

Чрез COSMOSWorks се решават задачи за статичен анализ, честотни задачи (за резонанс), загуба на устойчивост, температурни задачи, нелинейни задачи, удар, оптимизация и умора [6].

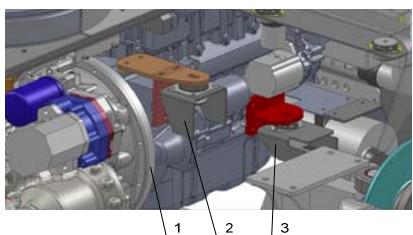
ИЗЛОЖЕНИЕ

1. Обект на изследването.

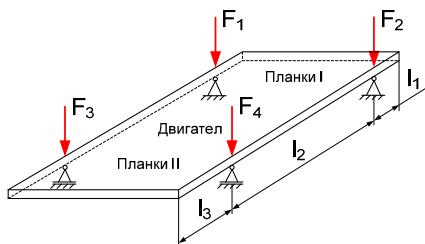


Фиг. 1. Шаси на 8,5 тонен кран – разработка на фирма „SL Industries”, гр. Русе.

Обект на изследването са два вида конструктивни планки, върху които е установлен двигателят на 8,5 тонен кран. Кранът е разработка на машиностроителната фирма „SL Industries“, която се намира в град Русе [8]. На фиг. 1 е дадено шасито на крана, а на фиг. 2 е показано и разположението на изследваните планки.



Фиг. 2. Изследван детайли.
1 – двигател, 2 – Планка II и 3 – Планка I



Фиг. 3. Схема на натоварването.

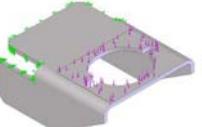
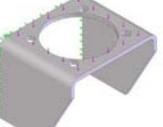
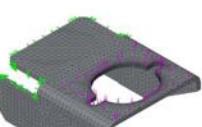
са натоварени със сила 1500 N , което се равнява на сили от по 750 N за всяка от двете планки или $F_3=F_4=750 \text{ N}$.

3. Изследване по метода на крайните елементи.

За определяне на якостното поведение на конструктивните детайли, показани на фиг. 2, е направено изследване на напрежнато-деформираното им състояние по метода на крайните елементи. Чрез COSMOSWorks е извършен статичен анализ, като решението включва следните етапи, дадени в табл. 1 [4, 6].

Табл. 1. Етапи при изследване с COSMOSWorks по метода на крайните елементи.

Етапи	Планка I	Планка II	Забележка
1. Създаване на тримерен модел.			Тримерните модели на детайлите са разработени с CAD системата SolidWorks.
2. Задаване на материал.	Стомана S355JO	Стомана S355JO	Материалът за детайлите е избран от библиотеката на SolidWorks.
3. Задаване на закрепването.			Закрепването е реализирано чрез ограничаване на всички степени на свобода, като съответства на местата, където планките се заваряват към шасито.

4. Задаване на натоварването.			Зададен е разпределен товар, съгласно схемата на натоварването, показана на фиг. 3.
5. Дискретизиране на модела.			Генерира се мрежа от крайни елементи, които имат общи възлови точки. В зоните, явяващи се концентратори на напрежения, мрежата от крайни елементи се сгъстява.

Получените резултатите от изчисленията по метода на крайните елементи с COSMOSWorks са дадени в табл. 2 и табл. 3. Изчисленията са проведени за три различни дебелини на листовия материал – 3 mm, 4 mm и 5 mm, и при две различни големини на крайните елементи. Големината на крайните елементи е определена чрез сходимост на решението.

Табл. 2. Резултати от изследване на тримерен модел на Планка I.

Планка I											
Големина на крайните елементи – h=3 mm и e=0,6 mm											
δ, mm	σ _x , MPa	σ _y , MPa	τ _{xy} , MPa	P ₁ , MPa	P ₂ , MPa	P ₃ , MPa	σ _{екв} ^{IV} , MPa	u, μm	Min FOS	Брой елементи	Брой възли
3	68,3	61,9	23,5	90,1	36,9	19,2	82,9	0,29	3,3	53325	93470
4	41,1	42,2	16,9	60,3	22,6	15,1	50,1	0,13	5,5	67383	113797
5	33,7	27,6	10,1	39,0	13,0	8,2	35,3	0,07	7,8	76277	127801

Големина на крайните елементи – h=2 mm и e=0,4 mm											
δ, mm	σ _x , MPa	σ _y , MPa	τ _{xy} , MPa	P ₁ , MPa	P ₂ , MPa	P ₃ , MPa	σ _{екв} ^{IV} , MPa	u, μm	Min FOS	Брой елементи	Брой възли
3	91,6	92,2	34,0	126,5	44,1	28,6	99,6	0,29	2,8	137964	231539
4	55,4	52,4	17,3	82,2	26,1	20,0	60,9	0,13	4,5	164032	268602
5	38,0	37,2	11,7	51,4	15,1	10,5	39,4	0,07	7,0	215126	340354

Табл. 3. Резултати от изследване на тримерен модел на Планка II.

Планка II											
Големина на крайните елементи – h=3 mm и e=0,6 mm											
δ, mm	σ _x , MPa	σ _y , MPa	τ _{xy} , MPa	P ₁ , MPa	P ₂ , MPa	P ₃ , MPa	σ _{екв} ^{IV} , MPa	u, μm	Min FOS	Брой елементи	Брой възли
3	29,3	32,5	11,6	75,9	10,0	7,8	81,3	0,27	3,4	63289	109506
4	16,7	19,0	6,1	44,6	5,7	3,7	48,9	0,12	5,6	80689	135260
5	12,6	11,8	3,9	30,7	4,9	4,4	34,6	0,06	7,9	91355	151169

Големина на крайните елементи – h=2 mm и e=0,4 mm											
δ, mm	σ _x , MPa	σ _y , MPa	τ _{xy} , MPa	P ₁ , MPa	P ₂ , MPa	P ₃ , MPa	σ _{екв} ^{IV} , MPa	u, μm	Min FOS	Брой елементи	Брой възли
3	31,4	34,1	11,0	76,0	12,2	11,4	81,5	0,27	3,4	150238	251759
4	17,4	18,3	6,1	44,7	6,0	4,5	49,0	0,12	5,6	191240	311312
5	13,0	11,9	3,9	30,7	5,0	4,4	34,7	0,06	7,9	240568	380524

В таблиците са означени:

- h е големина на крайните елементи в mm;

- e – големина на крайните елементи в зоните, концентратори на напрежения, mm;

- δ – дебелина на листовия материал, от който са изработени изследваните детайли, mm ;

- σ_x , σ_y , τ_{xy} – компоненти на напреженията за приетата координатна система, MPa ;

- P_1 , P_2 , P_3 – главни напрежения, MPa ;

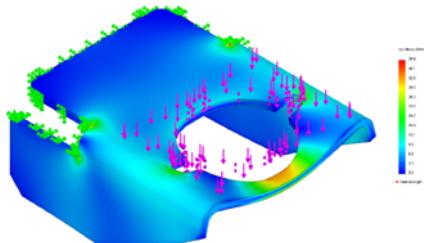
- σ_{eke}^{IV} – еквивалентни напрежения във възлите по IV якостна теория, MPa ;

- u – премествания в структурата на детайлите, μm ;

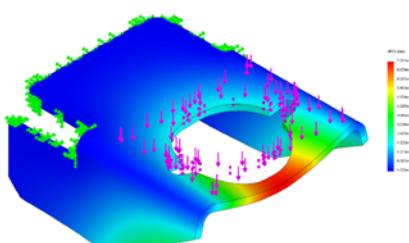
- $Min FOS$ – минимален коефициент на сигурност.

Изследваните планки са подложени на постоянни вибрации, ударни натоварвания и въртящи моменти създавани от двигателя. Затова от конструктивна гледна точка и съгласно получените резултати в табл. 2 и табл. 3, за еквивалентните напрежения σ_{eke}^{IV} и преместванията u е избрано, Планка I и Планка II да бъдат изработени от листов материал с дебелина 5 mm. За тази дебелина на материала, коефициентът на сигурност $Min FOS$ се получава с най-голяма стойност.

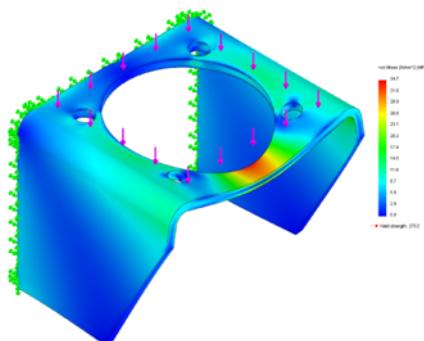
На фиг. 4, фиг. 5, фиг. 6 и фиг. 7, е показано графично разпределението на еквивалентните напреженията σ_{eke}^{IV} и преместванията u за Планка I и Планка II. Резултатите са за детайли изработени от листов материал с дебелина 5 mm и големина на крайните елементи – $h=2 mm$ и $e=0,4 mm$.



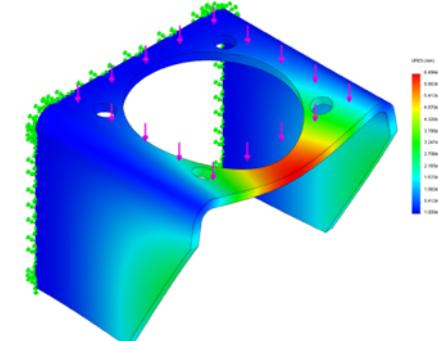
Фиг. 4. Разпределение на еквивалентните напреженията σ_{eke}^{IV} за Планка I при $\delta=5 mm$.



Фиг. 5. Разпределение на преместванията u за Планка I при $\delta=5 mm$.



Фиг. 6. Разпределение на еквивалентните напреженията σ_{eke}^{IV} за Планка II при $\delta=5 mm$.



Фиг. 7. Разпределение на преместванията u за Планка II при $\delta=5 mm$.

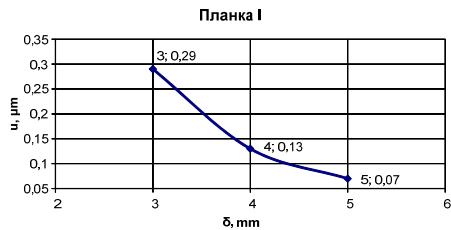
На фиг. 8, фиг. 9, фиг. 10 и фиг. 11 е показано изменението на еквивалентните напреженията σ_{eke}^{IV} и преместванията u в зависимост от дебелината на листовия материал.



Фиг. 8. Изменение на еквивалентните напрежения $\sigma_{\text{екв}}^{\text{IV}}$ за Планка I, в зависимост от дебелината δ на листовия материал.



Фиг. 10. Изменение на еквивалентните напрежения $\sigma_{\text{екв}}^{\text{IV}}$ за Планка II, в зависимост от дебелината δ на листовия материал.



Фиг. 9. Изменение на преместванията u за Планка I, в зависимост от дебелината δ на листовия материал.



Фиг. 11. Изменение на преместванията u за Планка II, в зависимост от дебелината δ на листовия материал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В резултат на направеното може да се обобщи:

- Представени са етапите на изследвания по метода на крайните елементи, при използване на системата *COSMOSWorks*.
- Получените резултати представляват якостна и деформационна проверка на конструктивните детайли – Планка I и Планка II.
- Увеличаването на дебелината на листовия материал δ води до намаляване на еквивалентните напрежения $\sigma_{\text{екв}}^{\text{IV}}$ и преместванията u , и до увеличаване на коефициента на сигурност *FOS*.
- Провеждането на инженерен анализ с помощта на метода на крайните елементи е подход, който значително съкращава процедурите по оптимизирането на конструктивните, технологичните и експлоатационните характеристики на различни детайли и конструкции, по отношение на запазване на необходимите им якостни показатели.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике. Мир, Москва, 1975.
- [2]. Иванов, И. Компютърно моделиране на непрекъснати среди. Русе, 2004.
- [3]. Русева Сл., К. Папазян, ЕСКД . Техника. София. 1988.
- [4]. Станков Н., А. Иванов, И. Драганов. Изследване на напрегнато-деформираното състояние на комбинирани инструменти за обработване на резбови отвори. Списание „Машини, технологии, материали”, година IV, брой 6, София, 2010, стр. 60-62.
- [5]. Стойчев, Г. Метод на крайните елементи – якостен и деформационен анализ. София, 2000.
- [6]. Хаджийски, В., Ст. Стефанов. Компютърен инженерен анализ на машинни елементи с CosmosWorks. Пловдив, 2007.
- [7]. www.kremikovtzi.com/bg/production/products/flat/index.html
- [8]. www.sl-industries.com.

За контакти:

маг. инж. Николай Станков, Катедра „Технология на машиностроенето и металорежещи машини”, Факултет „Машинно-технологичен”, Русенски университет „Ангел Кънчев”, тел.: 082/888 714,
e-mail: nstankov@uni-ruse.bg.

гл. ас. д-р инж. Александър Кирилов Иванов, Катедра „Технология на машиностроенето и металорежещи машини”, Факултет „Машинно-технологичен”,
Русенски университет “Ангел Кънчев”, тел.: 082/888 714,
e-mail: akivanov@uni-ruse.bg.

Метод за определяне на отклонението от форма без използване на специално оборудване

автор: Айдън Ахмедов
научен ръководител: гл. ас. д-р инж. Данко Тонев

Abstract: A method for determination of the shape deviation without using specialized equipment. This article presents an analysis of three methods for creating an approximating surface and their practical application. The devices for measuring of the shape deviation have been studied and a method for determination of the shape deviation is proposed. The mathematical model for the method has been presented and its error has been determined based on experimental studies.

Key words: Measurement of roundness deviation, runout.

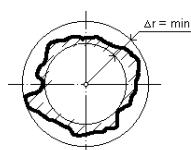
ВЪВЕДЕНИЕ

Отклонението на формата е важен функционален показател и се определя като отклонение на формата на реалната повърхнина спрямо идеалната обвиваща повърхнина. В стандарти са въведени три критерия за построяване на апроксимиращите елементи на повърхнините [1,2,3].

1. Критерии за построяване на апроксимиращи повърхнини

Критерий 1. Минимум на максималното отклонение.

По изисквания от стандарта се построява идеалния обвиващ елемент, имащ формата на базова окръжност, която лежи извън детайла, допира се до най-външната точка (или няколко точки). След това се построява втора окръжност (концентрична на първата), която се допира до най-вътрешната точка (или точки) на реалната повърхнина (фиг.1.).



Фиг.1. Обвиваща по метода минимум на максималното отклонение [3]

Разстоянието между двете номинални окръжности представлява отклонението на формата на реалния профил спрямо идеалния [3]. За да се реализира този случай се построява окръжност по метода на най-малките квадрати и от нейния център се поставят другите две обвивачи.



Фиг.2. Обвиваща по метода на трите точки [3]

Критерий 2. Минимум (максимум) на размера на сдружавания елемент. Изискването на тук е номиналната повърхнина да се построи по такъв начин, все едно че реалната повърхнина би се слободила с нея с нулева хлабина. Определят се трите най-външни (ако е отвор трите най-вътрешни) точки и се построява идеалната обвиваща окръжност (фиг.2). Разстоянието между най-вътрешната (или най-външната точка) до апроксимиращата повърхнина, измерена по нормалата е отклонението от форма [3]. Обикновено калибрите за алтернативен контрол работят по този критерий.

Критерий 3. Минимум на сумата от квадратите на отклоненията. Апроксимиращият елемент се построява по



Фиг. 3. Обвиваща по метода на най-малките квадрати [3]

такъв начин, че сумата от квадратите на разстоянията между реалния елемент и него да бъде минимална (подобно на критерий 1). От фиг. 3. се вижда, че идеалната окръжност е разположена вътре в материала на изследвания детайл, за разлика от предходните два метода. Много често този метод се използва за оценка на пресови повърхнини, които участват в пресови съединения [3].

ИЗЛОЖЕНИЕ

1. Средства за измерване на отклонението от форма

За оценяване на отклонението от форма на цилиндрична повърхнинав напречно сечение съществуват различни средства, всяко от които се характеризира със своите предимства.

1.1. Оценяване на отклонението от кръглост с образцова гравна.

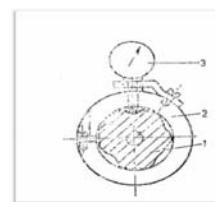
Едно от средствата за оценяване на пълно измерване на отклонението от кръглост е показано на фиг.4 [1].

Измерваният детайл 1 се поставя в гравната 2, който при ограничена дължина материализира обвиващият елемент. Измервателната глава 3 се закрепва неподвижно към гравната и се установява по такъв начин, че измервателният й накрайник да се допира до измерваният детайл. При пълно завъртане на детайл се определя максималната разлика между показанията на измервателната глава.

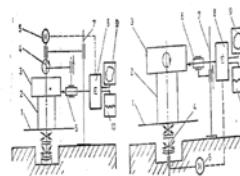
Най-голямата разлика между показанията, отчетени за едно пълно завъртане на измерваният детайл, съответства на отклонението от кръглост, отнесено към обвиващата окръжност. Вижда се, че този метод съответства на втория критерий за построяване на апроскимираща повърхнинав. Това средство обикновено се използва в масовото и едросерийното производство при допуски на диаметри границите от 4-та до 8-ма степен на точност. Недостатък му се състои в това, че: има грешка на самата измервателна глава, грешка при изработване на еталонната гравна и при нерегулируема гравна е възможно да се получи хлабина между нея и детайлата.

1.2. Измерване с използване на прецизно въртеливо движение.

Това е най-точният и най - широко разпространения метод на измерване, чрез който е възможно да бъде определено отклонението от кръглост в съответствие с определението му, дадено в стандарта. Измервателните уреди се наричат кръгломери. Измерването се извършва чрез сравняване на реалният профил с траекторията (изходна база), образувана в резултат на измерване с точен вретенен възел и измервателно устройство.



Фиг.4. Измерване на отклонение от кръглост с образцова гравна
1-измерван детайл; 2-гравна; 3-измервателна глава



Фиг.5.Принципна схема на кръгломер [1]
а- с въртящ се детайл; б- с въртящ се датчик;
1- измервателна маса; 2,3-първа и втора шийка на измервания стъпален вал ; 4-ос на въртене; 5-електродвигател; 6-електрически измервателен преобразувател (датчик); 7 -праволинейна вертикална направляваща; 8- електронен блок; 9,10-записващи устройства.

Методът може да бъде реализиран при въртящ се датчик и неподвижен детайл (5,а) или въртящ се заедно с масата на уреда детайл и неподвижен датчик (5,б).

При съвременните кръгломери оценката на отклонение на кръглост може да се извърши спрямо различни бази- обвиваща окръжност, средната окръжност и минималната зона. Случайните разлики от резултата на измерването са в границите на $\pm 15\%$. Измереният профил се представя във увеличен мащаб във вид на полярна или нелинейна профилограма чрез записващите устройства 9 и 10 или на дисплей.

1.3. Метод за измерване на отклонението от форма чрез универсална делителна глава и индикаторен преобразувател.

Измервателният детайл 1 се закрепва между центрите 3 (фиг 2.1.), при което общата ос на центровите отвори образува неговата ос на въртене. Детайлът трябва да се върти с постоянна скорост, при което повърхнината му се опипва от измервателният накрайник на датчика 2 и се фиксира изменението на показанието на свързаният с него уред за един оборот, т.е. радиалното биене. Измервателният сигнал се получава като наслагване на две съставки: ексцентрициитета на измерваното напречно сечение спрямо оста на въртене (първи хармонична) и отклонението от кръглост. Затова трябва да бъде предвиден електрически филтър за ниски честоти, който да изключва съставката, предизвикана от ексцентрициитета.

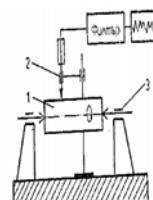
След филтрирането измервателният сигнал се подава или на показващият уред, или на линейното записващо устройство. Даденият метод може да се приложи и при други начини на базиране (установяване) на измерваният детайл, например при завъртане в призма или патронник.

Отклонението от кръглост може да бъде отчетено или по скалата на показващия уред или определено по линейната диаграма. При използването на показващ уред отклонението се определя като най-голяма разлика между показанията за един оборот на измервателният детайл и се отчита непосредствено по скалата, ако е предвидено устройство за запомняне на екстремалните стойности. При използване на записващо устройство отклонението се определя като разстояние между най-високата и най-ниската точка на линейната диаграма. Базова окръжност се явява средната [1,2].

1.3.1. Методика за провеждане на експерименталните изследвания.

Предлаганият метод за оценяване на отклонението от форма много се доближава до този, изложен в точка 1.3., но има и някои различия.

Известно е, че ексценциитетът представлява ниско честотна систематична съставляваща с период 2π , върху която се добавя (наслагва) грешката на формата на цилиндричната повърхнина в напречно сечение, която статистически има случаен характер. За елиминиране на влиянието на ексценциитета е целесъобразно да се използва класическия подход за компенсиране



Фиг.7. Уред за измерване на радиално биене
1-измерван детайл; 2-датчик; 3-центри;



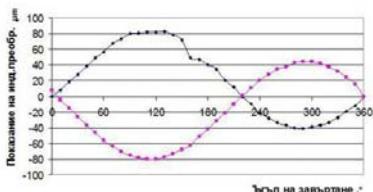
Фиг.8. Универсална делителна глава
1-детайл; 2-измервателен преобразувател;
3,4-центри; 5-стойка за измервателният
накрайник; 6-маса; 7-делителен апарат;
8-дигитална скала; 9-ръчка за въртене на центъра
4; 10-скала

на проявленето на систематичната грешка по знак. За целта се използва схема за компенсиране на периодични систематични грешки чрез две последователни измервания на ротационния детайл от дефазирани на 180° начални положения и сумиране на получените резултати. По този начин ще се елиминира грешката от установяване на детайла и в същото време ще се намери отклонението на формата на детайла.

За по-прецисни измервания е използвана универсална делителна глава с константа $i=1$. Изследвания са няколко детайла, но в настоящата статия са показани резултатите само на единия.

Детайлът се поставя между центрите 3 и 4 и с помощта на ръчката 9 се завърта на 360 градуса, като на всеки 10 градуса се отчита измерваното отклонение (фиг.8). По този начин се получава кривата 1, показана на фиг.9. След като е завършен единия оборот, детайлът се завърта на 180 градуса, индикаторният часовник отново се нулира и от тази точка отново се правят 36 измервания през 10 градуса. По този начин се построява се кривата 2, показана на фиг.9.

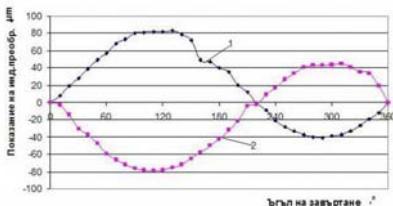
Чрез гармоничен анализ на данните от кривата 1 се изключва случайната съставляваща от грешката на формата (преобразуванията на Фурье), а полученната периодична крива (синусоида) определя „в чист вид” ексцентрицитета на измерваната повърхнина. Чрез сумиране на стойностите на отклоненията



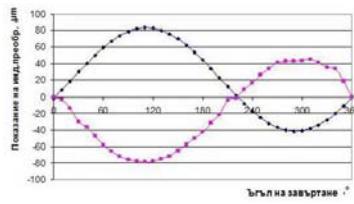
Фиг.9. Криви на радиалното биене

определят случайната съставляваща на резултата от измерването и представляват отклонения от форма (некръглост) в съответните сечения. За базов обвиващ елемент на метода е приета средната окръжност (критерий „среден елемент”), а отклонението от кръглост се определя от размаха между двете екстремни стойности.

Този алгоритъм може да се приложи и в обратен ред, като първо се определи ексцентрицитета от данните от кривата 2 (второто измерване), а отклонението от



Фиг.9. Криви на радиалното биене



Фиг.10. Обработена крива 1, чрез преобразувания на Фурье

(координатите) на кривата 2 („замърсена“) и аналогичните координати на синусоидата 1, получени при един и същ търгъл на завъртане спрямо началото на измерване, се елиминира систематичното влияние на ексцентрицитета. Получените след тази операция остатъчни стойности



Фиг.11. Кръгломер Talyrond 200

кърглост се пресметне по данните (остатъчните стойности) от първото измерване (крива 1) (фиг.11).

След съответните преобразувания на двете криви и обработване на съответните резултати става ясно, че отклонението на формата при обработване на първата крива и събирането и с координатите на втората е $\Delta_{10}=21,5\mu m$. При обработване първо на втората, а след това събиране на нейните координати с първата отклонението на формата е $\Delta_{10}=21\mu m$. За да бъдат потвърдени тези резултати е необходимо детайла да бъде измерен на специализиран уред за измерване на отклонението от форма или по-точно тук е използван профилограф-къргломер Talyrond 200, показан на фиг.11.

Този метод за определяне на отклонението от формата оценява този критерий при условие, че идеалната окръжност е построена по метода на най малките квадрати и затова на уреда е зададена опция да изследва отклонението от кърглост на детайла чрез точно този критерий. На фиг.12. е показана съответната профилограмма, от която се вижда че отклонението от формата е $\Delta_{10}=25,8\mu m$.

Изследванията относно грешката на метода показват, че резултатите получени чрез него и тези, получени чрез измерване с профилограф се различават с около 18% за дадените показатели на изследвания детайл.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базата на теоретичните зависимости и експериментални изследвания могат да се направят следните изводи:

1. Анализирани са трите метода за построяване на апроксимираща повърхнина и случайте, за които е най-удачно да се използва съответният критерий.
2. Въз основа на експерименталните изследвания е доказана работоспособността на предлагания метод и е установена съответната му грешка за разглежданите случаи.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Димитров Д. Взаимозаменяемост, стандартизация и технически измервания. София, Техника, 1987.
- [2] Радев Хр. Уреди за измерване на линейни и ъглови размери. София, Техника, 1989.
- [3]. http://www.mit1.hit.bg/Temi/Tema_7/ukazania_7.1.htm

За контакти:

гл. ас. д-р инж. Данко Христов Тонев, Катедра „Технология на машиностроенето и металорежещи машини”, тел.: 082/888493, e-mail: dtonev@uni-ruse.bg.

Айдън Лютфиев Ахмедов, специалност: „Управление на качеството”, катедра: Катедра „Технология на машиностроенето и металорежещи машини”, факултет Машинно- технологичен.



Фиг.12. Профилограма от Къргломер Talyrond 200

Многокритериална оптимизация по метода PSIMS с непрекъснато и дискретно изменящи се параметри

автор: Пънфей Джоу
научен ръководител: д-р Велина Боздуганова

Multi-criteria optimization by PSIMS-method with continuous and discrete varying parameters.
In multi-criteria optimization by the universal PSI (Parametric Space Investigation)-method in the case of continuous and discrete varying parameters, after the sounding in the continuous region, the constraints for discreteness are included. Improved μ -selection, which makes it possible to find sufficient number of ranged Pareto-optimal solutions is proposed.

Key words: mechanical systems; optimal design; multi-objective optimization; PSI-method; μ -selection; ranged Pareto-subsets; Salukvadze optimum.

ВЪВЕДЕНИЕ

Съвременните задачи за оптимално проектиране на механични системи са многокритериални [1, 6, 8, 11, 14]. При формулирането и решаването им възникват трудно преодолими проблеми.

Първият проблем е свързан със сложната структура на многокритериалните задачи за проектиране, които могат да съдържат не само интервални и функционални ограничения върху варируемите параметри, но и критериални ограничения. Това прави невъзможни предварителното определяне на допустимо множество от проектни варианти в параметричното пространство и формулиране на оптимизационна задача.

Още две обстоятелства усложняват допълнително съставянето на оптимационен модел. Обикновено проектантът няма ясна и точна представа за някои граници на изменение на управляващите параметри, степента на стесняващо влияние на функционалните ограничения, както и за евентуалните пределно допустими стойности на разнообразни по физически смисъл и мащаб на изменение критерии, когато проектните параметри се избират в неизвестна допустима област.

Друга особеност е взаимно нееднозначното функционално изображение на допустимото параметрично множество D в достащимо критериално множество P , т.е. на всяка допустима точка (проект) $u \in D$ съответства само една точка от P , докато на една точка $f \in P$ могат да съответстват няколко точки u . Изход от посочения проблем е използване на специфична изчислителна технология, която позволява формулирането и решаването на многокритериалната задача да се извършва едновременно.

Вторият проблем произтича от необходимостта достатъчно пълно, точно и равномерно да се генерира дискретно множество от Парето-оптимални решения, които са неподобряеми и несравними помежду си. Предложени са различни методи за получаване на приблизително Парето-множество, например в [1, 6, 10, 11, 12]. Обикновено то съдържа много решения и неговото задоволително определяне в задачите за многокритериално проектиране изисква значителни компютърни усилия. Те могат да се оправдаят чрез неформален анализ на Парето-множеството с цел установяване на общи свойства, принципи и зависимости с иновативна стойност за проектирания обект [7].

В [1, 14] е разработен универсален метод PSI (Parametric Space Investigation) за решаване на задачи за многокритериално проектиране, който успешно преодолява посочените два проблема. В него се използва процедура за равномерно сондиране на многомерна параметрична област по квази'Monte Carlo метод [1] и определяне на множество от приблизително неподобряеми проектни решения, които удовлетворяват принципа за Парето-оптималност [11].

Третият проблем е свързан с високата степен на неопределеност при избора на еднозначно решение от голям брой варианти в Парето-множеството. Този избор винаги е свързан с въвеждане на субективен елемент в решаването на оптимизационната задача. Това е довело до разработване на различни процедури за обосновано съкращаване на Парето-множеството [2, 3, 4, 9, 12] с цел улесняване на избора на окончателно решение.

В [2, 4] методът PSI е допълнен с процедура за т.н. “ μ -селекция”, която определя ранжирани подмножества от неподобряеми решения с помощта на три критерия (компоненти на вектора μ) за оценяване на геометрични свойства на точките от Парето-множеството. В някои случаи, например при наличие на дискретно изменящи се параметри на оптимизационния модел, конфигурацията на Парето-фронт е такава, че след μ -селекцията се излъчва само една точка, или много малък брой ранжирани точки, което съществено намалява ефективността на тази процедура. В настоящата разработка е предложен видоизменен вариант на метода PSIMS, който запазва предимствата на μ -селекцията при възникване на посочената ситуация.

МНОГОКРИТЕРИАЛНА ОПТИМИЗАЦИЯ ПО МЕТОДА PSIMS

1. Оптимизационна задача

Задачата за многокритериално проектиране може да се представи като обобщена задача за нелинейно оптимиране [1, 14]

$$\begin{aligned} \text{Pmin}_{\mathbf{u} \in \mathbf{D}} \mathbf{f}(\mathbf{u}), \\ \mathbf{D} \equiv \{\mathbf{u} \in \mathbf{\Pi}: \mathbf{g}(\mathbf{u}) \leq \mathbf{0}, \mathbf{G}(\mathbf{f}(\mathbf{u})) \leq \mathbf{0}\}, \quad \mathbf{\Pi} \equiv \{\mathbf{u}: \mathbf{u}^- \leq \mathbf{u} \leq \mathbf{u}^+\}, \end{aligned} \quad (1)$$

където: $\mathbf{u} = [u_j]$, $j \in [1:m] \equiv \{1, 2, \dots, m\}$ е m -мерният управляващ параметричен вектор; $\mathbf{f} = [f_i]$, $i \in [1:n]$ – векторният критерий; $\mathbf{g}(\mathbf{u})$ и $\mathbf{G}(\mathbf{f}(\mathbf{u}))$ са векторните функции (със съответни размерности) в зададените ограничения върху управляващите параметри u_j и критериите f_i ; \mathbf{u}^- и \mathbf{u}^+ – зададените вектори с гранични стойности u_j^- и u_j^+ на компонентите на вектора \mathbf{u} ; \mathbf{D} е допустимата област на изменение на управляващия вектор; “Pmin” – операторът за определяне на глобални Парето-минимални стойности на вектора \mathbf{f} . На допустимото множество $\mathbf{D} \subset \mathbf{\Pi}$ в параметричното пространство съответства множество $\mathbf{P} \equiv \{\mathbf{f}(\mathbf{u}): \mathbf{u} \in \mathbf{D}\}$ от достъпими стойности на критериите.

В [3] е показано, че широк клас статични и динамични задачи за оптимизационен синтез на дискретни механични системи, включително и с ограничена параметрична неопределеност, могат да се преобразуват в задачи от вида (1).

Решаването на задача (1) се основава на принципа за съгласувана оптималност на В. Парето [11]. Оптимално решение са две Парето-множества $\mathbf{D}^* \subset \mathbf{D}$ и $\mathbf{P}^* \subset \mathbf{P}$ от съответните точки $\mathbf{u}^* \in \mathbf{D}^* \equiv \{\mathbf{u}^*: \mathbf{u}^* = \arg \text{Pmin}_{\mathbf{u} \in \mathbf{D}} \mathbf{f}(\mathbf{u})\}$ и $\mathbf{f}^* \in \mathbf{P}^* \equiv \{\mathbf{f}^*: \mathbf{f}^* = \mathbf{f}(\mathbf{u}^*)\}$.

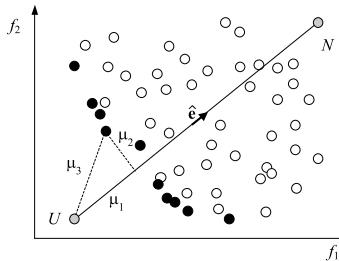
2. Изчислителна процедура

Решаването на задача (1) с метода PSIMS се осъществява в два етапа [2].

В Етап 1 се определят Парето-оптимални решения по метода PSI [13] в следната последователност:

- Генериране на зададен брой N_s квазивномерно разпределени Соболеви пробни точки \mathbf{u} в m -мерния паралелепипед $\mathbf{\Pi} \equiv \{\mathbf{u}: \mathbf{u}^- \leq \mathbf{u} \leq \mathbf{u}^+\}$.
- Определяне на допустимо $\mathbf{u} \in \mathbf{D} \subset \mathbf{\Pi}$ и достъпимо $\mathbf{f}(\mathbf{u}) \in \mathbf{P}$ множество.
 - Определяне на Парето-оптимални множества $\mathbf{D}^* \subset \mathbf{D}$ и $\mathbf{P}^* \subset \mathbf{P}$.

В Етап 2 се осъществява μ -селекция на ранжирани намалени Парето-множества [2, 4] с помощта на три геометрични критерия $\mu \equiv [\mu_t]$, $t \in [1:3]$ (фиг. 1), които се определят за всяка точка $\mathbf{f}^* \in \mathbf{P}^*$.

Фиг. 1. Геометрични критерии μ_1, μ_2, μ_3 за случая на два критерия f_1 и f_2 [3]

Процедурата за μ -селекция се състои в:

- Определяне на положителната U и отрицателната N утопични точки $\mathbf{f}^U = [f_1^U, f_2^U]$, $\mathbf{f}^N = [f_1^N, f_2^N]$, където: $f_i^U = \min_{\mathbf{u} \in D^*} f_i(\mathbf{u})$; $f_i^N = \max_{\mathbf{u} \in D^*} f_i(\mathbf{u})$; $i \in [1:n]$.
- Определяне на вектора $\mu(\mathbf{f}^*) = [\mu_t]$, $t \in [1:3]$, където: $\mu_1 = \|\mathbf{p}\|$; $\mu_2 = \|\mathbf{q}\|$; $\mu_3 = \|\mathbf{r}\|$; $\mathbf{r}(\mathbf{f}^*) = \mathbf{f}^* - \mathbf{f}^U$; $\mathbf{p}(\mathbf{f}^*) = (\mathbf{r} \cdot \mathbf{e})\mathbf{e}$; $\mathbf{q}(\mathbf{f}^*) = \mathbf{r} - \mathbf{p}$; $\mathbf{e} = (\mathbf{f}^N - \mathbf{f}^U)/\|\mathbf{f}^N - \mathbf{f}^U\|$. По този начин изходната многокритериална задача се преобразува в трикритериална, която лесно се визуализира.
- Определяне на аргументите \mathbf{f}^{*t} на минимумите μ_t^* на геометричните критерии $\mu_t(\mathbf{f}^*)$, $t \in [1:3]$, които в общия случай съответстват на различни точки \mathbf{f}^* .
- Селекциониране на шест подмножества $\mathbf{M}_\rho = \{\mathbf{f}^*: \mu_h(\mathbf{f}^*) \leq \mu_h(\mathbf{f}^{*t})\}$, $h, t \in [1:3]$, $h \neq t$, $\rho \in \mathbf{K} = \{(1,2), (2,1), (1,3), (3,1), (2,3), (3,2)\}$.
- Определяне ред на ефективност R_E на всяка точка $\mathbf{f}^* = \mathbf{f}(\mathbf{u}^*) \in \mathbf{M} = \cup_{\rho \in \mathbf{K}} \{\mathbf{M}_\rho\}$ в зависимост от броя на подмножествата \mathbf{M}_ρ , на които тя принадлежи.
- Сортиране на точките $\mathbf{u}^* \in D^*$ и $\mathbf{f}^* \in \mathbf{M}$ в подмножества \mathbf{D}_{R_E} и \mathbf{M}_{R_E} , ранжирани по ред на ефективност $R_E \in \{6, 5, \dots, 1\}$.
- Определяне на Салуквадзе-оптимум [13] ($\mathbf{u}^S = \arg \min_{\mathbf{u} \in D} \mu_3(\mathbf{u})$, $\mathbf{f}^S = \mathbf{f}(\mathbf{u}^S)$) на задача (1), съвпадащ с решението, което има ред на ефективност $R_E = 6$. То разкрива потенциалните възможности за равномерно приближаване на всички частни критерии f_i до идеалните им стойности f_i^U при условие, че критериите са равноценни.
- Проектантът избира еднозначно решение след анализ на ранжиряните Парето-оптимални варианти в множествата \mathbf{D}_{R_E} и \mathbf{M}_{R_E} , $R_E \in \{6, 5, \dots, 1\}$, започвайки с преценка на решението $(\mathbf{u}^S, \mathbf{f}^S)$.

3. Видоизменен вариант на метода PSIMS

В Етап 1 на метода PSIMS се използват квазиравномерно разпределени Соболеви пробни точки $\mathbf{Q}_\alpha = \{q_{1\alpha}, q_{2\alpha}, \dots, q_{m\alpha}\}$, $\alpha \in [1:N_s]$ в m -мерен единичен хиперкуб [1].

При непрекъснато изменящи се управляващи параметри, точките \mathbf{Q}_α се преобразуват чрез линейна трансформация

$$u_{j\alpha} = u_{j\alpha}^- + q_{j\alpha}(u_j^+ - u_j^-), \quad j \in [1:m], \quad \alpha \in [1:N_s] \quad (2)$$

в N_s квазиравномерно разпределени точки в областта $\mathbf{\Pi} = \{\mathbf{u}: \mathbf{u}^- \leq \mathbf{u} \leq \mathbf{u}^+\}$.

При дискретно изменящи се параметри Парето-множеството \mathbf{P}^* е несвързано.

Нека векторът $\mathbf{u} = [\mathbf{x}, \mathbf{y}]$, се състои от непрекъснато изменящ се вектор $\mathbf{x} = [x_\xi]$, $\xi \in [1:m_1]$ и от дискретно изменящ се вектор $\mathbf{y} = [y_\eta]$, $\eta \in [1:m_2]$, където $m_1 + m_2 = m$.

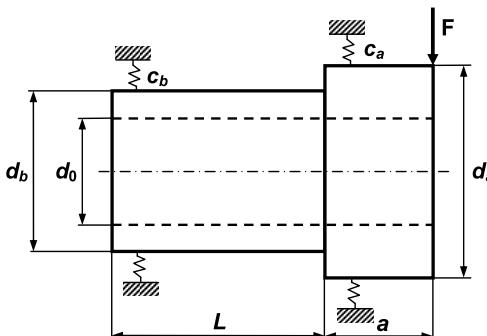
Възможни са три случая:

- Векторът \mathbf{u} се определя от (2), но компонентите u_η на съставката \mathbf{y} се закръглят до най-близко цяло число.
- Компонентите u_η приемат стойности от зададени дискретни множества $\mathbf{Y}_\eta \equiv [y_\eta], \eta \in [1:m_2]$.
- Компонентите $y_\zeta, \zeta \leq \eta$ приемат постоянни стойности $y_\zeta = C_\zeta \equiv \text{const.}$

Ако μ -селекцията в *Eтап 2* предоставя малък брой ранжирани компромисни решения, увеличаването на броя им се извършва чрез неколкократна μ -селекция в N стъпки с последователно отстраняване на решението от шести ред до достигане на желания брой алтернативни компромисни решения. Всяка нова стъпка има обновен ред на ефективност $R_E^{(\beta)}, \beta \in [1:N]$. Получените нови решения се обединяват с предходните. По този начин се запазва многоалтернативността при избора на окончателно решение.

ПРИМЕР: ОПТИМАЛНО ПРОЕКТИРАНЕ НА ВРЕТЕНО НА МЕТАЛОРЕЖЕЩА МАШИНА

Тази моделна задача е предложена в [8] и е допълнена в [5]. Варируемите параметри са четири (фиг. 2): диаметър на отвора d_o , междуопорно разстояние L , диаметър на дясната част на вретеното d_a , диаметър на лявата част на вретеното d_b . Променливите d_a и d_b приемат стойности от зададени дискретни множества.



Фиг. 2. Схема на вретено на металорежеща машина

В десния си край вретеното е натоварено с вертикална сила F . Оптималният избор на проектните параметри трябва да се направи чрез минимизиране на два противоречиви критерия – обема $f_1(d_o, L, d_a, d_b) \equiv V$ и статичното преместване $f_2(d_o, L, d_a, d_b) \equiv \delta$ на оста на вретеното в приложната точка на силата F в дясното сечение.

Непрекъснато варируемите параметри $x_1 \equiv d_o$ и $x_2 \equiv L$ се изменят в зададени интервали $[x_j^-, x_j^+], j \in \{1,2\}$, а дискретните параметри $y_1 \equiv d_a$ и $y_2 \equiv d_b$ приемат стойности от зададени дискретни множества \mathbf{Y}_1 и \mathbf{Y}_2 .

Оптимизационната задача има следния общ вид

$$\begin{aligned}
 & \text{Pmin}_{\mathbf{u} \in \mathbf{D}} \mathbf{f}(\mathbf{u}); \\
 & \mathbf{f} = \{f_1(\mathbf{u}), f_2(\mathbf{u})\}; \\
 & \mathbf{u} \equiv \{\mathbf{x}, \mathbf{y}\}, \quad \mathbf{x} \equiv \{x_1, x_2\}; \quad \mathbf{y} \equiv \{y_1, y_2\}; \tag{3} \\
 & \mathbf{D} \equiv \{\mathbf{u}: g_1 \equiv p_1 x_1 - y_2 \leq 0, g_2 \equiv p_2 y_2 - y_1 \leq 0, g_3 \equiv |\Delta_a + (\Delta_a - \Delta_b)a/x_2| - \Delta \leq 0,
 \end{aligned}$$

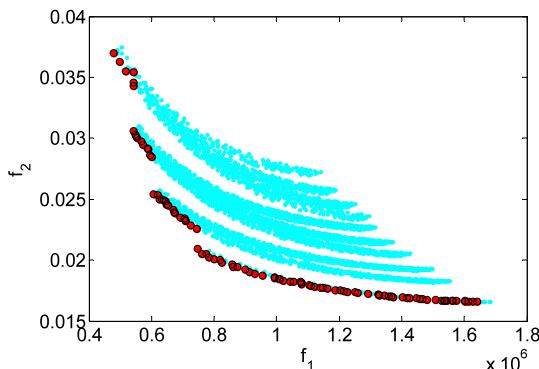
$$y_1 \in \mathbf{Y}_1, y_2 \in \mathbf{Y}_2, \mathbf{u} \in \Pi \},$$

$$\Pi = \{\mathbf{u}: x_1^- \leq x_1 \leq x_1^+, x_2^- \leq x_2 \leq x_2^+, y_1^- \leq y_1 \leq y_1^+, y_2^- \leq y_2 \leq y_2^+\},$$

където: $f_1 = V$; $f_2 = \delta$; $x_1 = d_0$; $x_2 = L$; $y_1 = d_a$; $y_2 = d_b$; $\mathbf{Y}_1 = \{80, 85, 90, 95\}$; $\mathbf{Y}_2 = \{75, 80, 85, 90\}$; $V = (\pi/4)[a(y_1^2 - x_1^2) + x_2(y_2^2 - x_1^2)]$; $\delta = Fa^3[1 + x_2J_a/(aJ_b)]/(3EJ_a) + F/c_a[(1 + a/x_2)^2 + c_a a^2/(c_b x_2^2)]$; $x_1^- = 25 \text{ mm}$; $x_1^+ = 70 \text{ mm}$; $x_2^- = 150 \text{ mm}$; $x_2^+ = 200 \text{ mm}$; $y_1^- = 80 \text{ mm}$, $y_1^+ = 95 \text{ mm}$, $y_2^- = 75 \text{ mm}$, $y_2^+ = 90 \text{ mm}$; $p_1 = 1.25$ и $p_2 = 1.05$ са коефициентите в ограниченията на диаметрите; $a = 80 \text{ mm}$ – дължината на конзолната част на вретеното; $\Delta_a = 0.0054 \text{ mm}$ и $\Delta_b = -0.0054 \text{ mm}$ – радиални премествания на десния и ляв лагери; $\Delta = 0.01 \text{ mm}$ – допустимото радиално преместване на десния край на вретеното; $\delta_a = 0.001 \text{ mm}$ и $\delta_b = -0.001 \text{ mm}$ – предварителната стегнатост на лагерите; $c_a = 35400 | \delta_a^{1/9} | u_3^{10/9}$ и $c_b = 35400 | \delta_b^{1/9} | u_4^{10/9}$ – коравините на лагерите; $J_a = \pi (u_3^4 - u_1^4)/64$ и $J_b = \pi (u_4^4 - u_1^4)/64$ – инерционните моменти; $E = 2.1(10)^5 \text{ N/mm}^2$ – модулът на еластичност на линейните деформации; $F = 10(10)^3 \text{ N}$ – големината на силата \mathbf{F} .

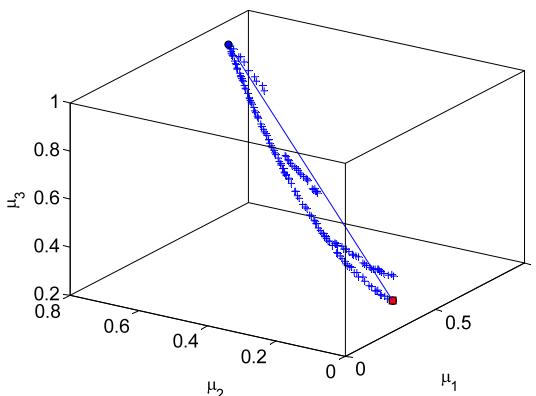
За приближено решаване на поставената моделна задача (3) се използва метода PSIMS. Сондирането в Етап 1 е изпълнено двукратно. Първо е направено сондиране с $N_s = 2^{12} = 4096$ квазиравномерно разпределени Соболеви пробни точки и са определени 97 Парето-оптимални точки. След това в интервалите на изменение на управляващите параметри, съответстващи на намерените компромисни точки, е направено ново сондиране със същия брой пробни точки, при което са определени 124 Парето-оптимални точки. Окончателно са получени 171 компромисни точки.

Фиг. 3 илюстрира достигимата област \mathbf{P} и Парето-оптималния фронт \mathbf{P}^* .

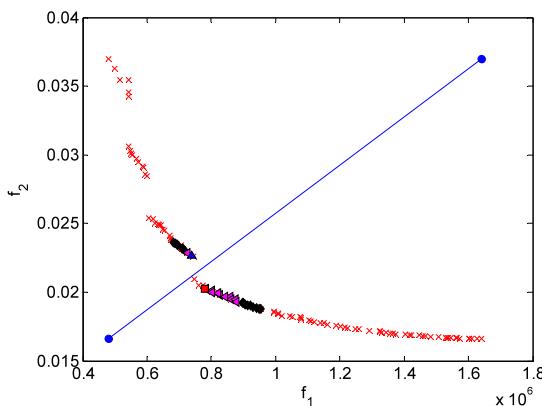


Фиг. 3. Достижимо и Парето-оптимално множество

На фиг. 4 са показани Парето-оптималните точки в μ -пространството, означени със символа “+”. След основната μ -селекция се получава само една точка с ред на ефективност $R = 6$, означена със символа “■”, която е Салуквадзе-оптимум. На същата фигура със символа “●”, са изобразени утопичните точки в μ -пространството и свързващата ги права – аналог на правата UN в критериалното пространство.

Фиг. 4. Парето-оптимални точки в μ -пространството

С видоизменения вариант на метода PSIMS са осъществени три допълнителни стъпки на μ -селекция, след които са получени 4 непусти ранжирани Парето-множества с общо 33 Парето-точки. Част от тези решения са представени в Таблица 1. Определените Парето-оптимални решения са означени на фиг. 5 със символа “ \times ”, а ранжираните Парето-оптимални подмножества с ред на ефективност $R_E = \{6, 4, 2, 1\}$ – съответно със символите “ \blacksquare , \blacktriangle , \blacktriangledown , \blacklozenge ”.

Фиг. 5. Резултат от μ -селекция след Стъпка 3

В Таблица 1 са включени две еднозначни решения, получени в [5] и [8] чрез скаларизиране на векторния критерий \mathbf{f} , които са близки до намерения Салуквадзе-оптимум.

При условие, че Салуквадзе-оптимумът е приемлив вариант, проектантът може да го избере за окончателно решение. В противен случай, ако достигнатото ниво на компромис по някой от критериите е нездоволително, той може да направи своя избор след анализ на компромисните решения с по-нисък ред на ефективност.

Таблица 1. Селекционирани Парето-оптимални решения по ред на ефективност R_E

Решения	R_E	f		u			
		$f_1 \equiv V(10)^5$ (mm ³)	$f_2 \equiv \delta$ (mm)	$x_1 \equiv d_o$ (mm)	$x_2 \equiv L$ (mm)	$y_1 \equiv d_a$ (mm)	$y_2 \equiv d_b$ (mm)
Салуквадзе-оптимум	6	7.4554	0.020691	69.597	188.79	95	90
Стъпка 1	$6^{(1)}$	7.6140	0.020485	69.026	188.47	95	90
Стъпка 2	$6^{(2)}$	7.7370	0.020390	68.698	189.51	95	90
	$4^{(2)}$	7.8037	0.020250	68.333	188.06	95	90
	$2^{(2)}$	7.8235	0.020227	68.261	188.03	95	90
	$1^{(2)}$	7.3911	0.022685	65.244	188.53	95	85
Стъпка 3	$6^{(3)}$	7.8037	0.020250	68.333	188.06	95	90
	$4^{(3)}$	7.3911	0.022685	65.244	188.53	95	85
	$2^{(3)}$	7.2587	0.022847	65.666	187.84	95	85

	$2^{(3)}$	8.7764	0.019315	64.879	188.19	95	90
	$1^{(3)}$	6.9152	0.023493	66.973	188.82	90	85

Еднозначно решение в [8]	–	6.9410	0.02308	66.400	183.30	95	85
Еднозначно решение в [5]	–	6.7289	0.02169	71.980	188.17	95	90

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Поради дискретността на част от проектните параметри, Парето-множеството е несвързано и за да се запази многоалтернативността на процедурата за μ -селекция, е целесъобразно да се използва предложението видоизменен вариант на метода PSIMS.
- Влиянието на изменението на параметъра d_o върху преместването на вретеното в приложната точка на силата F е значително за $d_o > 50$ mm, т.е. за втората половина на допустимия интервал $[x_1^-, x_1^+]$. Това е основание той да се стесни предварително, което ще намали областта Π .
- Анализът на ранжираните Парето-оптимални решения на задача (2) показва, че компромисните стойности на параметрите d_o , d_a и d_b са близки до горните им граници, а L приема стойности около средата на допустимия интервал $[x_2^-, x_2^+]$.
- Числените характеристики на Парето-оптималните проекти са близки до посочените в [5] и [8].
- Използваната видоизменена процедура PSIMS позволява да се определи множество от Парето-оптимални проекти, а окончателният избор да се осъществи по-лесно от Парето-подмножества, ранжирани по ред на ефективност R_E .

Тази разработка е частично финансирана по Тема № 2011–МТФ–01 от фонд “Научни изследвания” за Машинно-технологичния факултет на Русенския университет.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Соболь, И.М., Р.Б. Статников. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. Дрофа, Москва, 2006.
- [2] Иванов, И.В., В.Г. Витлиев, П.А. Коев. Процедура за селекциониране на намалено множество от Парето-оптимални решения. Механика на машините, Т. 13 (55), № 1, 104 -105, 2005.
- [3] Чешанков, Б.И., В.Г. Витлиев, П.А. Коев. Многокритериален параметричен синтез на механични системи: Част 1. Оптимизационен подход. Механика на машините, Т. 8 (32), № 4, 97-102, 2000.
- [4] Cheshankov, B.I., I.V. Ivanov, V.G. Vitliemov, P.A. Koev. PSI-method multicriteria optimization contracting the set of trade-off solutions. 15-th International Conference on Systems Science, Wroclaw, Poland, Vol. 1, 281-288, 2004.
- [5] Coello, C.A.C. An empirical study of evolutionary techniques for multiobjective optimization in engineering design. PhD dissertation. Department of Computer Science, Tulane University, New Orleans, Louisiana, USA, 1996.
- [6] Deb, K. Multi-objective Optimization Using Evolutionary Algorithms. Wiley, Chichester, 2001.
- [7] Deb, K. Innovization: Discovering Innovative Solution Principles Through Optimization. Springer, Berlin, 2011.
- [8] Eschenauer, H., J. Koski, A. Osyczka, (Eds.). Multicriteria Design Optimization. Springer, Berlin, 1990.
- [9] Mattson, C.A., A.A. Mullur, A. Messac. Minimal representation of multiobjective design space using a smart Pareto filter. 9-th AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. Paper AIAA 2002-5458, Atlanta (GA), 2002.
- [10] Messac, A., A.I. Yahaya, C.A. Mattson. The normalized normal constraint method for generating the Pareto frontier. Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 25, No. 2, 86-98, 2003.
- [11] Osyczka, A. Evolutionary algorithms for single and multicriteria design optimization. Physica-Verlag, Heidelberg, 2002.
- [12] Osyczka, A., S. Kreinich. Evolutionary algorithms for multicriteria optimization with selecting a representative subset of Pareto optimal solutions. Zitzler, E. et al., (Eds.). Evolutionary Multicriterion Optimization. Lecture notes in Computer Science. Springer, Berlin, 141-153, 2001.
- [13] Salukvadze, M.E. Vector-Valued Optimization Problems in Optimal Control Theory. Academic Press, New York, 1979.
- [14] Statnikov, R.B., J.B. Matusov. Multicriteria Analysis in Engineering. Kluwer, Dordrecht, 2002.

За контакти:

Пънфей Джоу, студент IV курс, фак. № 071111, спец. “Компютъризирано проектиране в машиностроенето и уредостроенето”, Машинно-технологичен факултет, Русенски университет.

Д-р инж. Велина Боздуганова, Катедра “Техническа механика”, Русенски университет, тел.: 082-888 572, e-mail: yelina@uni-ruse.bg.

Извеждане на косоъгълен краен елемент

автор: Ваня Василева
научен ръководител: ас. инж. Иво Драганов

Abstract: Working out slantways finite element slant coordinate system was defined. The equation of elasticity theory in that coordinate system was worked out. The stiffness matrix of hexahedron finite element with eight nodes was presented. The relation between engineering and tensorial shear strain was confirmed.

Key words: slant coordinate system, elasticity theory

ВЪВЕДЕНИЕ

Коравинните матрици на осем възлови хексаедърни крайни елементи са известни [1], [5], [8]. Те са изведени в декартова локална координатна система като са използвани уравненията на теория на еластичността, изведени също в декартова координатна система [2]. Тензорите на напреженията и деформациите се представят чрез вектори, а връзката между тях - законът на Хук, се дава чрез използване на матрица, съдържаща материалните характеристики. За да е коректна тази връзка се въвежда понятието *технически ъглови деформации* като те са два пъти по-големи от *тензорните* - тези които се получават, когато законът на Хук е в тензорен вид [7].

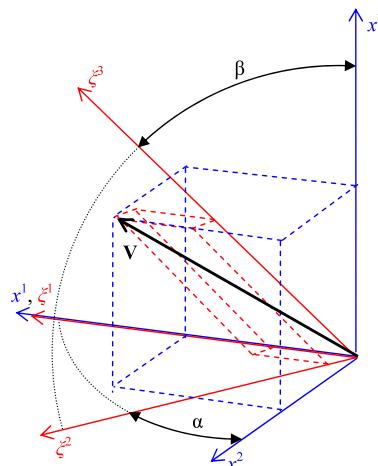
При извеждане на краен елемент в косоъгълна координатна система остава открит въпросът дали подредбата на компонентите на тензорите на напрежението, деформацията и материалните характеристики във вектори и матрица са идентични и дали връзката между техническите и тензорните ъглови деформации се запазва.

ИЗЛОЖЕНИЕ

1. Косоъгълна координатна система

Въвеждаме нови координати (ξ^1, ξ^2, ξ^3) чрез зависимостите:
 $x^1 = \xi^1 l_1 + (\xi^2 l_2 + \xi^3 l_3 \sin \beta) \sin \alpha; x^2 = (\xi^2 l_2 + \xi^3 l_3 \sin \beta) \cos \alpha; x^3 = \xi^3 l_3 \cos \beta.$ (1)

С α е означен ъгълът между осите x^2 и ξ^2 (фиг.1), а с β - ъгълът между оста x^3 и оста ξ^3 в равнината $x^3 \xi^2$.



Фиг. 1. Декартова и косоъгълна координатни системи
Обратната зависимост на (1) е:

$$\xi^1 = (x^1 - x^2 \operatorname{tg} \alpha) / l_1; \quad \xi^2 = (x^2 - x^3 \operatorname{tg} \beta \cos \alpha) / (l_2 \cos \alpha); \quad \xi^3 = x^3 \frac{1}{l_3 \cos \beta}. \quad (2)$$

За ковариантните базисни вектори се получава:

$$\mathbf{g}_1 = l_1 \mathbf{e}_1; \quad \mathbf{g}_2 = l_2 (\sin \alpha \mathbf{e}_1 + \cos \alpha \mathbf{e}_2); \quad \mathbf{g}_3 = l_3 (\sin \beta \sin \alpha \mathbf{e}_1 + \sin \beta \cos \alpha \mathbf{e}_2 + \cos \beta \mathbf{e}_3) \quad (3)$$

Ковариантният метричен тензор е:

$$g_{ij} = \begin{pmatrix} l_1^2 & l_1 l_2 \sin \alpha & l_1 l_3 \sin \alpha \sin \beta \\ l_1 l_2 \sin \alpha & l_2^2 & l_2 l_3 \sin \beta \\ l_1 l_3 \sin \alpha \sin \beta & l_2 l_3 \sin \beta & l_3^2 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Метричен контравариантен тензор - $g_{ik} g^{kj} = \delta_{ij}$:

$$g^{ij} = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{\sin \alpha}{l_1 l_2 \cos^2 \alpha} & 0 \\ -\frac{\sin \alpha}{l_1 l_2 \cos^2 \alpha} & \frac{1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \beta}{l_2^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} & -\frac{\sin \beta}{l_2 l_3 \cos^2 \beta} \\ 0 & -\frac{\sin \beta}{l_2 l_3 \cos^2 \beta} & \frac{1}{l_3^2 \cos^2 \beta} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Контравариантен базис - $\mathbf{g}^i = g^{ij} \mathbf{g}_j$:

$$\begin{aligned} \mathbf{g}^1 &= \frac{1}{l_1} \mathbf{e}_1 - \frac{\operatorname{tg} \alpha}{l_1} \mathbf{e}_2; \quad \mathbf{g}^2 = \sin \alpha \operatorname{tg}^2 \beta \frac{(l_3 - l_2)}{l_2 l_3} \mathbf{e}_1 + \frac{(l_3 - l_2) \cos^2 \alpha \sin^2 \beta + l_3 \cos^2 \beta}{l_2 l_3 \cos \alpha \cos^2 \beta} \mathbf{e}_2 + \frac{\operatorname{tg} \beta}{l_3} \mathbf{e}_3; \\ \mathbf{g}^3 &= \frac{\sin \beta \sin \alpha (l_2 - l_3)}{l_3^2 \cos^2 \beta} \mathbf{e}_1 + \frac{\sin \beta \cos \alpha (l_2 - l_3)}{l_3^2 \cos^2 \beta} \mathbf{e}_2 + \frac{l_2}{l_3^2 \cos \beta} \mathbf{e}_3. \end{aligned} \quad (6)$$

Символи на Кристофел от I-ви род - $\Gamma_{ijk} = \frac{1}{2} (g_{jk,i} + g_{ki,j} + g_{ij,k})$:

$$\Gamma_{ijk} = 0. \quad (7)$$

Символи на Кристофел от II-ри род - $\Gamma_{ij}^l = g^{lk} \Gamma_{ijk}$:

$$\Gamma_{ij}^l = 0. \quad (8)$$

2. Уравнения на теория на еластичността [7]

Уравнения на статиката - $\tau^{ji}|_j + p^i = 0; \quad \tau^{ij}|_k = \tau_{,k}^{ij} + \Gamma_{km}^i \tau^{mj} + \Gamma_{km}^j \tau^{im}$:

$$\begin{aligned} \tau^{11,1} + \tau^{21,2} + \tau^{31,3} + p^1 &= 0, \quad \tau^{12,1} + \tau^{22,2} + \tau^{32,3} + p^2 = 0, \\ \tau^{13,1} + \tau^{23,2} + \tau^{33,3} + p^3 &= 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Уравнения на геометрията - $\gamma_{ij} = \frac{1}{2} (v_i|_j + v_j|i) = \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i}) - \Gamma_{ij}^k v_k$:

$$\gamma_{11} = v_{1,1}, \quad \gamma_{22} = v_{2,2}, \quad \gamma_{33} = v_{3,3}, \quad \gamma_{12} = \frac{1}{2} (v_{1,2} + v_{2,1}), \quad \gamma_{23} = \frac{1}{2} (v_{2,3} + v_{3,2}), \quad \gamma_{31} = \frac{1}{2} (v_{3,1} + v_{1,3}). \quad (10)$$

Уравнения на физиката - $\tau^{ij} = C^{ijkl} \gamma_{kl}$, като

$$C^{ijkl} = G \left(g^{ik} g^{jl} + g^{il} g^{jk} + \frac{2\nu}{1-2\nu} g^{ij} g^{kl} \right):$$

$$\begin{aligned}\tau^{11} = & 2G \frac{1}{l_1^4 \cos^4 \alpha} \frac{1-\mu}{1-2\mu} \gamma_{11} + 2G \frac{\cos^2 \beta \sin^2 \alpha (1-\mu) + \mu \cos^2 \alpha}{l_1^2 l_2^2 \cos^4 \alpha \cos^2 \beta (1-2\mu)} \gamma_{22} + \\ & + 2G \frac{1}{l_1^2 l_3^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} \frac{\mu}{1-2\mu} \gamma_{33} - 4G \frac{\sin \alpha}{l_1^3 l_2 \cos^4 \alpha} \frac{1-\mu}{1-2\mu} \gamma_{12} + \\ & - 4G \frac{\sin \beta}{l_1^2 l_3 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} \frac{\mu}{1-2\mu} \gamma_{23},\end{aligned}\quad (11a)$$

$$\begin{aligned}\tau^{22} = & 2G \frac{\cos^2 \beta \sin^2 \alpha (1-\mu) + \mu \cos^2 \alpha}{l_1^2 l_2^2 \cos^4 \alpha \cos^2 \beta (1-2\mu)} \gamma_{11} + \\ & + 2G \frac{\cos^4 \alpha + \cos^4 \beta + \cos^4 \alpha \cos^4 \beta + 2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta \sin^2 \alpha - 2 \cos^2 \alpha \cos^4 \beta}{l_2^4 \cos^4 \alpha \cos^4 \beta} \frac{1-\mu}{1-2\mu} \gamma_{22} + \\ & + 2G \frac{\cos^2 \alpha \sin^2 \beta (1-\mu) + \mu \cos^2 \beta}{l_2^2 l_3^2 \cos^2 \alpha \cos^4 \beta (1-2\mu)} \gamma_{33} - 4G \frac{\sin \alpha (\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha)}{l_1 l_2^3 \cos^4 \alpha \cos^2 \beta} \frac{1-\mu}{1-2\mu} \gamma_{12} - \\ & - 4G \frac{\sin \beta (\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha)}{l_1^2 l_3 \cos^2 \alpha \cos^4 \beta} \frac{1-\mu}{1-2\mu} \gamma_{23} + 4G \frac{\sin \alpha \sin \beta}{l_1 l_2^2 l_3 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} \gamma_{31},\end{aligned}\quad (11b)$$

$$\begin{aligned}\tau^{33} = & 2G \frac{\mu}{l_1^2 l_3^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta (1-2\mu)} \gamma_{11} + 2G \frac{\cos^2 \alpha \sin^2 \beta (1-\mu) + \mu \cos^2 \beta}{l_2^2 l_3^2 \cos^2 \alpha \cos^4 \beta (1-2\mu)} \gamma_{22} + \\ & + 2G \frac{1-\mu}{l_3^4 \cos^4 \beta (1-2\mu)} \gamma_{33} - 4G \frac{\sin \alpha}{l_1 l_2 l_3^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} \frac{\mu}{1-2\mu} \gamma_{12} - 4G \frac{\sin \beta}{l_2 l_3^3 \cos^4 \beta} \frac{1-\mu}{1-2\mu} \gamma_{23},\end{aligned}\quad (11c)$$

$$\begin{aligned}\tau^{12} = & -2G \frac{\sin \alpha}{l_1^3 l_2 \cos^4 \alpha} \frac{1-\mu}{1-2\mu} \gamma_{11} - 2G \frac{\sin \alpha (\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha)}{l_1 l_2^3 \cos^4 \alpha \cos^2 \beta} \frac{1-\mu}{1-2\mu} \gamma_{22} - \\ & - 2G \frac{\sin \alpha}{l_1 l_2 l_3^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} \frac{\mu}{1-2\mu} \gamma_{33} + 2G \frac{2 \cos^2 \alpha \sin^2 \beta (1-\mu) + \cos^2 \alpha (1-2\mu)}{l_1^2 l_2^2 \cos^4 \alpha \cos^2 \beta (1-2\mu)} \gamma_{12} + \\ & + 2G \frac{\sin \alpha \sin \beta}{l_1 l_2^2 l_3 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} \frac{1}{1+2\mu} \gamma_{23} - 2G \frac{\sin \beta}{l_1^2 l_2 l_3 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} \gamma_{31},\end{aligned}\quad (11d)$$

$$\begin{aligned}\tau^{23} = & -2G \frac{\sin \beta}{l_1^2 l_2 l_3 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} \frac{\mu}{1-2\mu} \gamma_{11} - 2G \frac{\sin \beta (\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha)}{l_2^3 l_3 \cos^2 \alpha \cos^4 \beta} \frac{1-\mu}{1-2\mu} \gamma_{22} - \\ & - 2G \frac{\sin \beta}{l_2 l_3^3 \cos^4 \beta} \frac{1-\mu}{1-2\mu} \gamma_{33} + 2G \frac{\sin \alpha \sin \beta}{l_1 l_2^2 l_3 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} \frac{1}{1-2\mu} \gamma_{12} + \\ & + 2G \frac{\cos^2 \beta (1-2\mu) + 2 \cos^2 \alpha \sin^2 \beta (1-\mu)}{l_2^2 l_3^2 \cos^2 \alpha \cos^4 \beta (1-2\mu)} \gamma_{23} - 2G \frac{\sin \alpha}{l_1 l_2 l_3^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} \gamma_{31},\end{aligned}\quad (11e)$$

$$\begin{aligned}\tau^{31} = & 2G \frac{\sin \alpha \sin \beta}{l_1 l_2^2 l_3 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} \gamma_{22} - 2G \frac{\sin \beta}{l_1^2 l_2 l_3 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} \gamma_{12} - 2G \frac{\sin \alpha}{l_1 l_2 l_3^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} \gamma_{23} + \\ & + \frac{2G}{l_1^2 l_3^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} \gamma_{31}.\end{aligned}\quad (11f)$$

За да се запишат уравненията на физиката в матрична форма се въвежда матрицата с материалните характеристики:

$$[C] = \begin{bmatrix} [C_{11}] & [C_{12}] \\ [C_{21}] & [C_{22}] \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
 [C_{11}] &= \frac{2G}{1-2\mu} \begin{bmatrix} \frac{1-\mu}{l_1^4 \cos^4 \alpha} & \frac{\cos^2 \beta \sin^2 \alpha(1-\mu) + \mu \cos^2 \alpha}{l_1^2 l_2^2 \cos^4 \alpha \cos^2 \beta} & \frac{\mu}{l_1^2 l_2^2 \cos^3 \alpha \cos^3 \beta} \\ \frac{\cos^2 \beta \sin^2 \alpha(1-\mu) + \mu \cos^2 \alpha}{l_1^2 l_2^2 \cos^4 \alpha \cos^2 \beta} & \frac{(\cos^4 \alpha + \cos^4 \beta + \cos^4 \alpha \cos^4 \beta + 2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta \sin^2 \alpha - 2 \cos^2 \alpha \cos^4 \beta)(1-\mu)}{l_2^4 l_3^2 \cos^4 \beta} & \frac{\cos^2 \alpha \sin^2 \beta(1-\mu) + \mu \cos^2 \beta}{l_2^2 l_3^2 \cos^3 \alpha \cos^3 \beta} \\ \frac{\mu}{l_1^2 l_2^2 \cos^3 \alpha \cos^3 \beta} & \frac{\cos^2 \alpha \sin^2 \beta(1-\mu) + \mu \cos^2 \beta}{l_2^2 l_3^2 \cos^3 \alpha \cos^3 \beta} & \frac{1-\mu}{l_1^2 l_3^2 \cos^4 \beta} \end{bmatrix}, \\
 [C_{22}] &= \frac{2G}{1-2\mu} \begin{bmatrix} \frac{2 \cos^2 \alpha \sin^2 \beta(1-\mu) + \cos^2 \alpha(1-2\mu)}{l_1^2 l_2^2 \cos^4 \alpha \cos^2 \beta} & \frac{\sin \alpha \sin \beta}{l_1^2 l_2^2 l_3 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} & \frac{-\sin \beta(1-2\mu)}{l_1^2 l_2^2 l_3 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} \\ \frac{\sin \alpha \sin \beta}{l_1^2 l_2^2 l_3 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} & \frac{\cos^2 \beta(1-2\mu) + 2 \cos^2 \alpha \sin^2 \beta(1-\mu)}{l_2^2 l_3^2 \cos^2 \alpha \cos^4 \beta} & \frac{\sin \alpha(1-2\mu)}{l_1 l_2 l_3^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} \\ -\frac{\sin \beta(1-2\mu)}{l_1^2 l_2 l_3 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} & -\frac{\sin \alpha(1-2\mu)}{l_1 l_2 l_3^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} & \frac{(1-2\mu)}{l_1^2 l_3^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} \end{bmatrix}, \\
 [C_{12}] &= \frac{2G}{1-2\mu} \begin{bmatrix} -2 \frac{\sin \alpha(\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha)(1-\mu)}{l_1 l_2^2 \cos^4 \alpha \cos^2 \beta} & -2 \frac{\sin \beta(\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha)(1-\mu)}{l_2^2 l_3 \cos^2 \alpha \cos^4 \beta} & 2 \frac{\sin \alpha \sin \beta(1-2\mu)}{l_1 l_2^2 l_3 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} \\ -2 \frac{\mu \sin \alpha}{l_1 l_2 l_3^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} & -2 \frac{\sin \beta(1-\mu)}{l_2 l_3^3 \cos^4 \beta} & 0 \end{bmatrix}, \\
 [C_{21}] &= \frac{2G}{1-2\mu} \begin{bmatrix} -\frac{\sin \alpha(1-\mu)}{l_1^3 l_2 \cos^4 \alpha} & -\frac{\sin \alpha(\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha)(1-\mu)}{l_1 l_2^2 \cos^4 \alpha \cos^2 \beta} & -\frac{\mu \sin \alpha}{l_1 l_2 l_3^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} \\ \frac{\mu \sin \beta}{l_1^2 l_2 l_3 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} & -\frac{\sin \beta(\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha)(1-\mu)}{l_2^2 l_3 \cos^2 \alpha \cos^4 \beta} & -\frac{\sin \beta(1-\mu)}{l_2 l_3^3 \cos^4 \beta} \\ 0 & \frac{\sin \alpha \sin \beta(1-2\mu)}{l_1 l_2^2 l_3 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} & 0 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

Вижда се, че матрицата $[C]$ не е симетрична. За да е изпълнено това, трябва или да се раздели $[C_{12}]$ и $[C_{22}]$ на 2 или да се умножи $[C_{21}]$ и $[C_{22}]$ на 2.

Ако вместо векторът γ се заместват техническите деформации ε (с което $[C_{12}]$ и $[C_{22}]$ се делят на 2 - $\varepsilon_{ij} = 2\gamma_{ij}$), се получава:

$$\begin{aligned}
 [H_{22}] &= \frac{2G}{1-2\mu} \begin{bmatrix} \frac{\cos^2 \alpha \sin^3 \beta(1-\mu) + 0,5 \cos^2 \alpha(1-2\mu)}{l_1^2 l_2^2 \cos^4 \alpha \cos^2 \beta} & \frac{0,5 \frac{\sin \alpha \sin \beta}{l_1 l_2^2 l_3 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} & \frac{-0,5 \frac{\sin \beta(1-2\mu)}{l_1^2 l_2 l_3 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta}} \\ 0,5 \frac{\sin \alpha \sin \beta}{l_1 l_2^2 l_3 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} & \frac{0,5 \cos^2 \beta(1-2\mu) + \cos^2 \alpha \sin^2 \beta(1-\mu)}{l_2^2 l_3^2 \cos^2 \alpha \cos^4 \beta} & \frac{-0,5 \frac{\sin \alpha(1-2\mu)}{l_1 l_2 l_3^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta}} \\ -0,5 \frac{\sin \beta(1-2\mu)}{l_1^2 l_2 l_3 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} & \frac{-0,5 \frac{\sin \alpha(1-\mu)}{l_1 l_2 l_3^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} & \frac{0,5 \frac{(1-2\mu)}{l_1^2 l_2^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta}} \end{bmatrix}, \\
 [H_{12}] &= \frac{2G}{1-2\mu} \begin{bmatrix} -\frac{\sin \alpha(1-\mu)}{l_1^3 l_2 \cos^4 \alpha} & -\frac{\mu \sin \beta}{l_1^2 l_2 l_3 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} & 0 \\ \frac{\sin \alpha(\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha)(1-\mu)}{l_1 l_2^3 \cos^4 \alpha \cos^2 \beta} & -\frac{\sin \beta(\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha)(1-\mu)}{l_2^3 l_3 \cos^2 \alpha \cos^4 \beta} & \frac{\sin \alpha \sin \beta(1-2\mu)}{l_1 l_2^2 l_3 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} \\ -\frac{\mu \sin \alpha}{l_1 l_2 l_3^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} & -\frac{\sin \beta(1-\mu)}{l_2 l_3^3 \cos^4 \beta} & 0 \end{bmatrix}. \tag{13}
 \end{aligned}$$

Тогава:

$$\{\tau\} = [H]\{\varepsilon\}. \tag{14}$$

3. Тримерен краен елемент

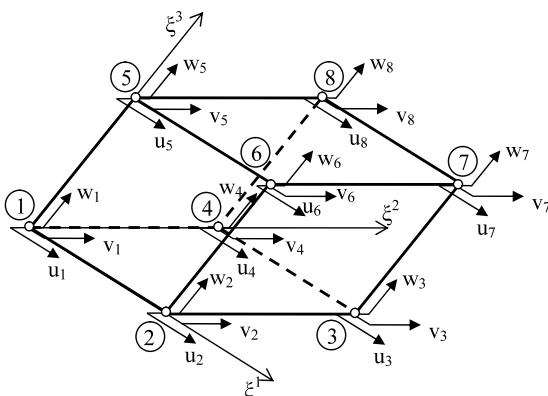
Тримерният осем възлов косоъгълен краен елемент има вида показан на фиг. 2.

Използвайки детерминантата на матрицата на Якоби:

$$\det[J_1] = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi^1} & \frac{\partial y}{\partial \xi^1} & \frac{\partial z}{\partial \xi^1} \\ \frac{\partial x}{\partial \xi^2} & \frac{\partial y}{\partial \xi^2} & \frac{\partial z}{\partial \xi^2} \\ \frac{\partial x}{\partial \xi^3} & \frac{\partial y}{\partial \xi^3} & \frac{\partial z}{\partial \xi^3} \end{vmatrix} = l_1 l_2 l_3 \cos \alpha \cos \beta, \quad (15)$$

за елементарния обем може да се запише:

$$dV = dx dy dz = \det[J] d\xi^1 d\xi^2 d\xi^3. \quad (16)$$



Фиг. 2. Тримерен косоъгълен краен елемент

Функциите на формата имат следния вид:

$$N_i = \frac{1}{8} (1 + \chi \chi_i) (1 + \eta \eta_i) (1 + \zeta \zeta_i). \quad (17)$$

Коравинната матрица се определя по зависимостта:

$$[K_e] = \int_{V_e} [B]^T [C] [B] dV. \quad (18)$$

Деформационната матрица $[B]$ се определя от уравнения (10), като за нейното извеждане е използвана програмна система Maple [3].

Степента на функцията, която се получава под интеграла в уравнение (19) е 2. Това налага използването на 8 гаусови точки. Координатите, в които трябва да се определят функциите и съответните теглови коефициенти са дадени в таблица 2 [6].

Таблица 2. Координати на гаусовите точки и теглови коефициенти

Координати на гаусовите точки	Теглови коефициенти
$\pm 0,557350269189626$	1

За определяне на коравинната матрица се извършва числено интегриране на уравнение (18) по метода на Гаус. При тримерна област е в сила:

$$[K_e] = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 W_i W_j W_k [B(\chi, \eta, \zeta)]^T [C(\chi, \eta, \zeta)] [B(\chi, \eta, \zeta)] \det[J_1(\chi, \eta, \zeta)] \det[J_2(\chi, \eta, \zeta)]. \quad (19)$$

Втората матрица на Якоби дава вързката между косоъгълните и нормирани координати, въведени за численото интегриране.

Създаден е алгоритъм в програмна система MATLAB [4] за изчисляване на коравинната. При полагане на $l_1 = l_2 = l_3 = 1$ и $\alpha = \beta = 0$ се получава коравинна

матрица равна на коравинната матрица на хексаедърен краен елемент с 8 възела в декартова координатна система.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При извеждане на краен елемент в косоъгълна координатна система подредбата на компонентите на тензорите на напрежението, деформацията и материалните характеристики във вектори и матрица са идентични и техническите ъглови деформации са два пъти по-големи от тензорните.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Банков Б., Ю. Павлова. Метод на крайните елементи в строителната механика. УАСГ, София, 1999.
- [2] Върбанов Хр. Теория на еластичността. Държавно издателство "Техника", 1965.
- [3] Дъяконов В. Maple 6: учебный курс. Издательский дом "Питер", 2001.
- [4] Йорданов Й. Приложение на MATLAB в инженерните изследвания част I и II. Русе, 2004.
- [5] Стойчев Г. Метод на крайните елементи. Якостен и деформационен анализ. София, 2000.
- [6] Abramovitz M., I. Stegun. Handbook of Mathematical Functions With Formulas, Graphs and Mathematical Tables. National Bureau of Standards Applied Mathematics, Series 55, 1972.
- [7] Eschenauer H., W. Schnell, Elastizitätstheorie Grundlagen, Flächentragwerke, Strukturoptimierung. Wissenschaftsverlag, 1995.
- [8] Zienkiewicz O., R. Taylor. The Finite Element Method. Volume 1: The Basis. Butterworth-Hinemann. 2000.

За контакти:

Ваня Пламенова Василева, Русенски университет „Ангел Кънчев”, специалност КПМУ, студентка IV курс

Ас. инж. Иво Драганов, Русенски университет “Ангел Кънчев”, Катедра “Техническа механика”, тел.: 082 888 224, e-mail: iivanov@uni-ruse.bg

Анализ на товароносимостта на остьклени конструкции със стъклени ребра

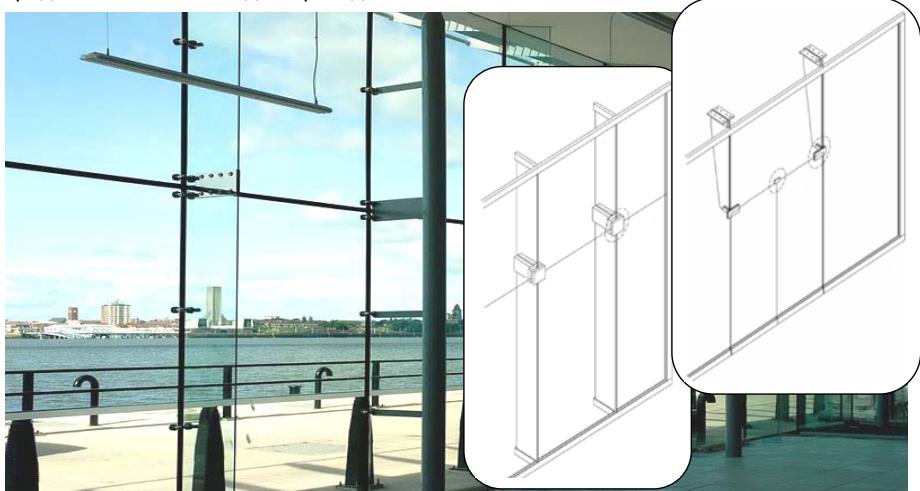
автор : Нели Стойкова
научен ръководител : ст. ас. инж. Димитър Велчев

Stability and strength analysis of the glass constructions with glass fins: Glass is a widely used engineering material of which the behaviour is not well known to the structural engineer and the architect. Glass wall systems with glass fins placed perpendicularly to the facing glass plates is a widely used structural form for shop fronts as it provides an aesthetic appearance and unobstructed view to the outside environment for the occupants. However, as the load on the fin is in the plane of the plate and along one edge, the glass fin may exhibit lateral instability at the unrestrained edge when under wind pressure. The finite element technique is employed for the present study of the strength and stability of the system. The results are analysed and compared to these gained from standard methods..

Key words: structural glass, glass fins, strength analysis, buckling, FEA.

1. Въведение

Съвременото строителство се наблюдава тенденция към увеличаване дела на фасадните остькления, като се използват все по-разнообразни конструкции при оформянето на стъклените фасадни стени. Развитието на технологията за производство на стъкло позволяват увеличаването на площа на стъклените панели и използването на носещи елементи от стъкло – колони и греди, което задоволява един от основните стремежи на архитектите – осигуряване на визуална свързаност между вътрешни и външни пространства. Въпреки голямото разнообразие от конструктивни решения, едно от най-често срещаните е стъклените стени с перпендикулярно поставени на тях стъклени ребра (фиг.1). Този вид конструкции се използват при оформянето на витрини на магазини, търговски и административни сгради, тъй като са сравнително прости, осигуряват безпрепятствена видимост и придават естетичен вид на фасадата.



Фиг.1. Остьклени конструкции със стъклени ребра

По своята функция стъклените ребра се явяват аналог на металните (алуминиеви и стоманени) профили от скелета на скелетните фасадни стени, като обикновено не ограничават стъклата по височина, а по дължина и могат да бъдат

поставени и за цял (непрекъснат) стъклен панел. Използват се за укрепване на стъклените площи, които са натоварени от вятър и други хоризонтални въздействия. Тези натоварвания приложени към стъклена фасада се предават на ребрата и от тях към основната носеща конструкция на сградата. Ребрата са прикрепени към стъклата чрез силикон или чрез болтове и към конструктивните елементи на сградата със специални опори, които възпрепятстват усукването им.

Въпреки, че стъклените ребра са подложени на същите натоварвания, като металните профили – атмосферни въздействия от вятър (и сняг при наклонените остькления) и собственото тегло на конструкцията, тяхното оразмеряване е значително по-сложно. Причините за това са две – материалът, от който са изработени и съотношението между размерите на напречните им сечения. Докато металните профили са с якост значително превишаваща якостта на стъклото и размероопределяща е коравината, която последните трябва да осигурят, за стъклените ребра размероопределяща е якостта. Освен това, за разлика от металните профили, които имат съотношения на размерите на напречните си сечения близки до единица, при стъклените ребра единият размер е над десет пъти по-голям от другия, което поставя въпроса за тяхната устойчивост.

Съществуват редица практически препоръки и методики за изчисляване и оразмеряване на стъклени ребра, но най-пълният достъпен източник е AS 1288 – 2006 [1], където са отчетени най-много фактори определящи размерите и товароносимостта на ребрата : якостта на силиконовата връзка, якостта на огъване на реброто, коравината на реброто, местната и общата загуба на устойчивост. Въпреки пълнотата на тази стандарт, той не решава редица въпроси произтичащи от голямото разнообразие на форми и размери на стъклените ребра срещани в практиката, както и голямото разнообразие от закрепвания: стъклените ребра могат да са просто подпрян или запънати в единия край и ставно подпрянни в другия или напълно конзолни, а ребрата по дълги от 8м обикновено са окачени в горния край, а късите – в долния. Възможно решение на горепосочените проблеми е изпозването на съвременни изчислителни методи, като метода на крайните елементи (МКЕ), но като всеки числен метод той трябва да бъде използван внимателно с оглед създаване на адекватни модели и постигане на смислени резултати.

Целта на настоящата работа е подробен анализ на методите предложени в AS 1288 с оглед използването им при създаване на адекватни модели на стъклени конструкции с напречни стъклени ребра, които в последствие могат да се използват за изчисляване на разнообразни конструкции от този вид.

4. Методи за оразмеряване по AS 1288 – 2006.

4. 1. Определяне дебелината на реброто

Якостта на силиконовата връзка зависи от дебелината на реброто (контактната площ), което е фиксирано към стъклото и по точно размерът С (фиг. 2) и ефективната широчина (фиг. 3, 4), подложена на ветровото натоварване. Размерът С зависи от хлабината между стъклените площи G и дебелината на реброто T (фиг. 1). Дебелината на реброто се определя от зависимостта:

$$(1) \quad T = \frac{E \cdot P_U}{\sigma_s} + G, \text{ където :}$$

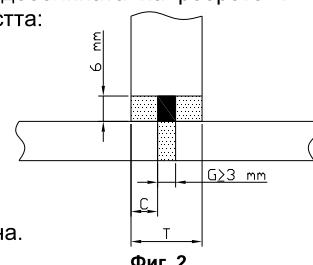
T – дебелината на реброто, mm;

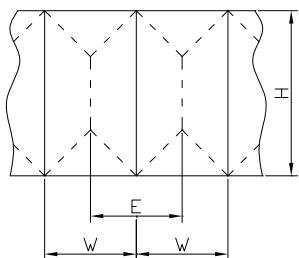
$G \geq 3\text{mm}$ – хлабината между стъклените площи;

E – ефективната широчина, m;

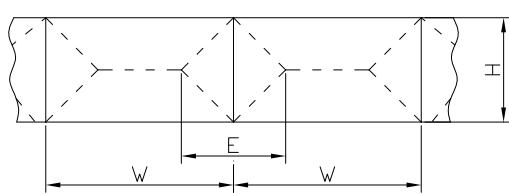
P_U – натоварване, KPa;

$\sigma_s = 0,21\text{MPa}$ – напрежение на разкъсване на силикона.





Фиг. 3



Фиг. 4

4.2. Определяне ширината на реброто

Широчината на реброто d , м се определя чрез зависимостта:

$$(2) \quad d = \sqrt{\frac{P_u H^3}{4\sigma_G t}} \left(\frac{3}{R} - \frac{1}{R^3} \right), \text{ където :}$$

H – ефективната височина, м;

$R = H/W$, при $H < W, R = 1$;

t – дебелината на реброто, мм;

σ_G – напрежение на разкъсване на силикона при ръбовете ($\sigma_G = 21,57$ MPa за 25mm отръсто стъкло);

P_u – натоварване, KPa;

4.3. Определяне на огъващият момент в стъкленото ребро

$$(3) \quad M_{or} = \frac{q \cdot H^2}{24} \left(3 - \frac{W^2}{H^2} \right), \text{ където :}$$

$q = P_u \cdot E$, kNm – разпределеният товар;

4.4. Проверка за местна загуба на устойчивост

$$(4) \quad M_{max} \leq \frac{E \cdot t^3}{6 \cdot (l + \nu)}, \text{ където :}$$

M_{max} – максималният некоригиран огъващ момент в реброто;

E – модул на еластичността на линеините деформации, Pa;

t – дебелината на реброто, mm;

ν – коефициент на Поансон.

4.5. Проверка за загуба на устойчивост от огъване (изкорубване), при ребро ограничено по цялата дължина :

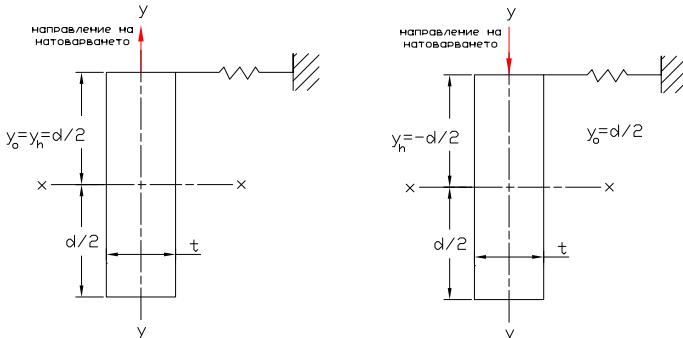
$$(5) \quad M_{CR} = \frac{(\pi / L_{ay})^2 \left\{ EIy \left[\frac{d^2}{4} + y_0^2 \right] + (GJ) \right\}}{2y_0 + y_h}, \text{ където :}$$

M_{CR} – критичният момент при който настъпва загуба на устойчивост;

L_{ay} – височината на стъкленото ребро, м;

$(EI)_y$ – коравина на огъване на реброто;

- d – широчина на реброто, mm;
 (GJ) – коравина на усукване;
 G – модул на еластичността на ъгловите деформации $G=28,7 \text{ GPa}$
 y_h – разстояние от неутралната ос до точката на натоварване, m (фиг. 5)



Фиг. 5

4. 6. Проверка на коравината на реброто

Максималното провисване, m се определя чрез зависимостта:

$$(6) \quad w = \frac{5.ql^4}{384EI}, \text{ където :}$$

$J = 0,333.T^3.d, \text{ m}^4$ – инерционен момент при усукване;
 l – височина на реброто, m.

5. Пример

5. 1 Определяне размерите на стъкленото ребро

Дебелината на реброто се определя от (1) :

$$T = \frac{1,5 \cdot 1}{0,21} + 3; \quad T = 10 \text{ mm}$$

Широчината на реброто $d, \text{ mm}$ се определя чрез зависимостта (2) :

$$d = \sqrt{\frac{1,6^3}{4,21,57,14} \left(\frac{3}{6/1,5} - \frac{1}{(6/1,5)^3} \right)}; \quad d = 500 \text{ mm}$$

Огъващият момент в стъкленото ребро се определя от (3) :

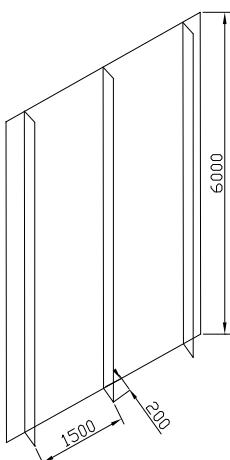
$$M_{\text{or}} = \frac{1,1 \cdot 5,6^2}{24} \left(3 - \frac{1,5^2}{6^2} \right); \quad M_{\text{or}} = 6,61 \text{ kN}$$

– проверка за местна загуба на устойчивост чрез зависимостта (4) :

$$M_{\text{max}} \leq \frac{70,10^9 \cdot 0,010^3}{6 \cdot (l + 0,22)}; \quad M_{\text{max}} \leq 9,56 \text{ kNm}$$

– проверка на коравината на реброто

Максималното провисване, m се определя от формула (6) :



$$w_{\max} = \frac{5.1.5.1.6^4}{384.10^6.(0.01.0.5^3/12)}; \quad w_{\max} = 0.0035m \quad w_{\max} = 3,5mm$$

– проверка за загуба на устойчивост от огъване (изкорубване) чрез зависимостта (5)

$$M_{CR} = \frac{(\pi/6)^2 \left\{ 70.10^9 (0.2.0.01^3/12) \left[\frac{0.2^2}{4} + 0.1^2 \right] + (28.7.10^9.0.2.0.01^3.0.333) \right\}}{2.0.1 \pm 0.1};$$

$$M_{CR+} = 6,64kNm$$

$$M_{CR-} = 19,9kNm$$

6. Създаване на модел в МКЕ

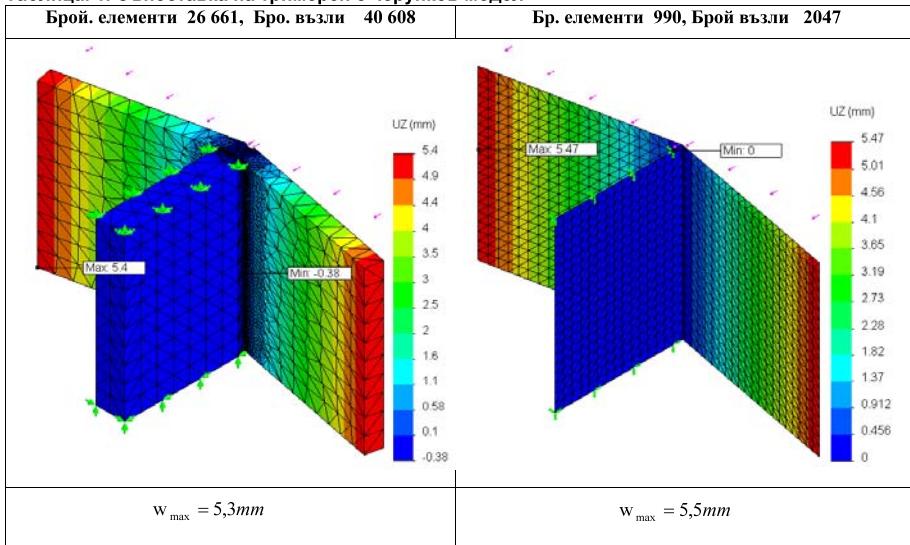
6. 1. Модел на силиконовата връзка

От изложеното дотук се вижда, че основен проблем при стъклените ребра е тяхната загуба на устойчивост поради съотношенията в размерите на напречното сечение, които са продиктувани от функционалните изисквания към ребрата.

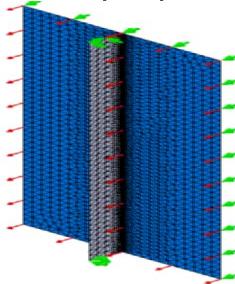
Показаните дотук методи, използвани в практиката имат силно опростени изчислителни схеми, които не отчитат действителния закон на разпределение на натоварването приложено върху реброто и влиянието на силиконовата връзка, което е от съществено значение. Затова е необходимо по задълбочено изследване със съвременни изчислителни методи какъвто е МКЕ. Моделирането в МКЕ е свързано с редица затруднения поради свойствата и размерите на силиконовата връзка. При дискретизация с пространствени крайни елементи е необходима висока гъстота на мрежата, което силно забавя решаването на системата уравнения. Поради това е необходимо модела на връзката да се опрости.

Едно възможно решение е изграждане на модел с черупкови КЕ вместо тримерени КЕ. За да се валидира черупковия модел е необходимо да се направи съпоставка с тримерен, като се сравнят максималните премествания в направление напречно на стъклените панели (табл. 1). По този начин се отчита влиянието на частичното запъване в силиконовата връзка.

Таблица. 1. Съпоставка на тримерен с черупков модел



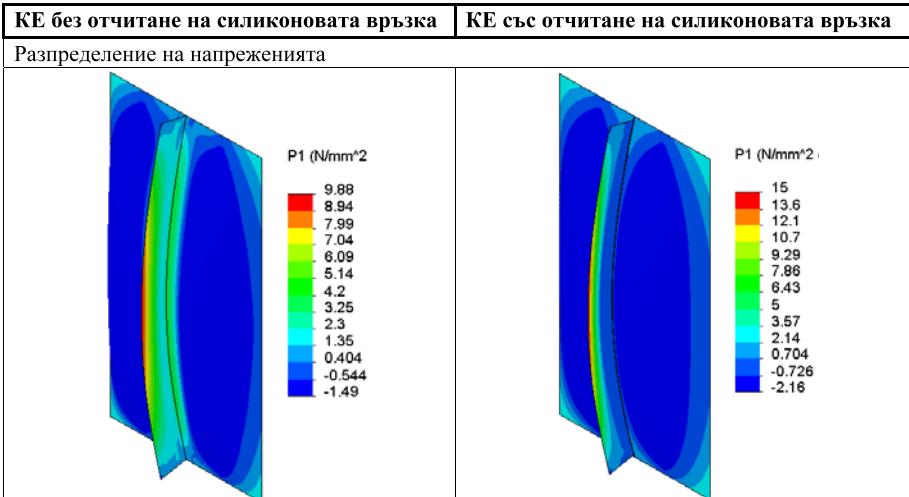
7. Пример за изчисляване по МКЕ



Решени са два примера с МКЕ, при единия се отчита силиконовата връзка, а при другия се пренебрегва. Това се прави с цел резултати получени от двата модела да се сравнят помежду си и с тези изчислени по стандартните методи (табл. 2). В табл. 3.4. са изложени получените резултати за преместванията, разпределението на напреженията и формите на изкълчване. На фигурата в ляво е показано приложеното натоварване и закрепване на модела.

Таблица. 2. Съпоставка на модел без отчитане с модел с отчитане на силиконова връзка.

КЕ без отчитане на силиконовата връзка	КЕ с отчитане на силиконовата връзка
Разпределение на преместванията	<p>UZ (mm)</p> <ul style="list-style-type: none"> 1.91 1.75 1.59 1.44 1.28 1.12 0.957 0.797 0.638 0.478 0.319 0.159 -0
Форми на изкълчване	



8. Анализ на резултатите и изводи

Таблица. 2. Резултати от изследването.

Метод за изчисляване	Стандартни методи	КЕ със отчитане на силиконовата връзка	КЕ без отчитане на силиконовата връзка
$\sigma_{\max} [MPa]$	16,2	15,0	9,88
$w_{\max} [mm]$	3,5	3,42	1,25
$k_{u_{\text{зк}}} = \frac{P_{kp}}{P_{np}}$	0,98	1,82	4,25
$k_{u_{\text{зк}}} = \frac{P_{kp}}{-P_{np}}$	2,95	–	–

Вижда се че изчислените резултати за напреженията по стандартните методи са много близки до тези на модел с КЕ без отчитане на силиконовата връзка, същото се отнася и за максималните напречни премествания. При отчитане на силиконовата връзка, преместванията респективно напреженията нарастват, което се дължи преди всичко на отчитането на взаимното завъртане между двете стъклени площи, от което следва, че конструкцията е застрашена, ако не се отчита силиконовата връзка.

Що се отнася до загубата на устойчивост, респективно критичните натоварвания силно се различават от тези получени по МКЕ. Причините за това още не са доизяснени. По принцип в литературата се обръща внимание на това, че критичните натоварвания при пресмятане с МКЕ се получават значително по големи от действителните и се препоръчва решаване на нелинейна задача със заложени геометрични несъвършенства на модела, например реброто да е под ъгъл различен от правия.

При сравняване на резултатите получени от моделите с КЕ е очевидно, че неотчитането на силиконовата връзка застрашава конструкцията от гледна точка на загуба на устойчивост.

По нататъшно усъвършенстване на моделите в МКЕ ще даде възможност да се добие по-точна представа за якостното и деформираното им състояние, като е възможно моделирането на конструкции с по-сложна форма на ребрата и разнообразни закрепвания. Чрез създаване на модели на остьклени конструкции със стъклени ребра може да се види поведението на елементите като цяло, при отчитане на връзката между тях, както и да се отрази едновременното влияние на приложените натоварвания и въздействия. Моделите могат да бъдат използвани в практиката при проектирането на такъв тип остьклявания, като лесно може да се варира с размерите, конфигурацията и закрепването, без да са необходими многократни ръчни изчисления. Така би се улеснила работата на инженера, който при проектирането трябва да се съобразява едновременно с работната (укрепваща) и естетичната функция (осигуряване на максимална прозрачност), която налага използването на стъклени ребра с минимални размери.

9. Литература

1. ASTM E 1300 – 3, Standard Practie for Determining the Load Resistance of Glass in Buildings, ASTM International, West Conshohocken, 2003.
2. AS 1288 – 2006, Appendix C
3. British Standard "BS 6262: Part 4: 1994 - Code of Practice for Glazing for Buildings"
4. Bondi, S., Capturing structural silicone non-linear behaviorvia the finite element method
5. Chan, S., Stability and strength analysis of glass wall systems stiffened by glass fins.
6. British Standard "BS 6262: Part 4: 1994 - Code of Practice for Glazing for Buildings" 6202

За контакти:

Нели Стойкова, студент IV курс, специалност “Машиностроителна техника и технологии”, Русенски университет “Ангел Кънчев”

гл. ас. Димитър Велчев, катедра “Техническа механика”, Русенски университет “Ангел Кънчев”, Тел.: 082 888224, E-mail: dvelchev@ru.acad.bg.

Якостно и деформационно пресмятане на остьклена скелетна фасадна стена

автор : Владимир Тотев

научен ръководител : ст. ас. инж. Димитър Велчев

Strength and stress analysis of the glass curtain wall: Pyramidal glass construction is analysed for determining of glass thickness and section properties of members of the bearing construction by standard methods and Finite Element Method. The specific distribution of wind pressure is used to achieve more precise results. Mixed finite element model is created - 3D beams finite elements for bearing construction and shell element for glass plates using SolidWorks and CosmosWorks. The results of both methods are analysed and compared.

Key words: structural glass, pyramidal construction, curtain wall, strength analysis, FEA

2. Въведение

В последните десетилетия в строителството на обществени и производствени сгради се налагат нови концепции при оформянето на фасадите им. Съвременните функционални, архитектурно-естетични и технико-икономически изисквания към сградите променят ролята на фасадните стени – от част от носещата конструкция на сградата те се превръщат в самостоятелни изделия, регулиращи осветлението, топлината и звука в помещенията. Тази им функция налага въвеждането на нови материали, увеличава дела на остькляването и като цяло променя конструкцията им и тяхното разглеждане от гледна точка на строителната механика. Използваните топло- и звуко-изолационни материали, както и стъклото имат висока себестойност и сравнително ниска носеща способност. Този факт налага статичната работа на стените да се сведе до поемане на натоварванията само от собственото тегло и от атмосферните въздействия от сняг и вятър, и като правило да не участват в носещата конструкция на сградата.

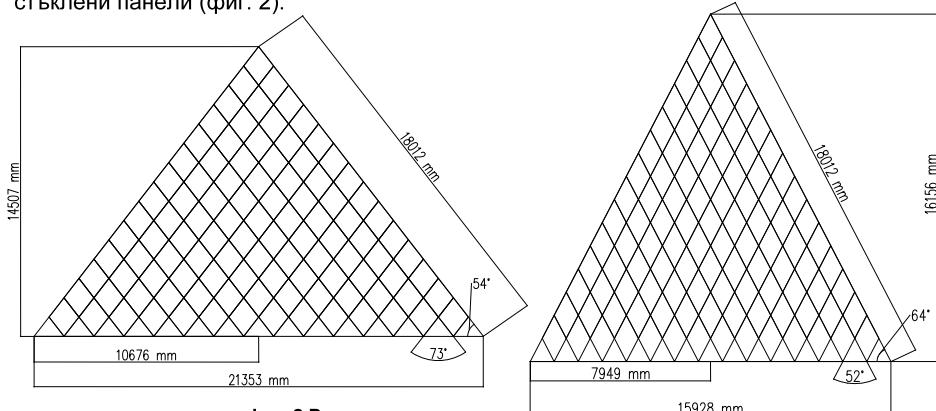
Пресмятането на тези конструкции се извършва по методи, които използват силно опростени изчислителни схеми и водят до преоразмеряване на конструкцията или застрашават сигурността ѝ. Това налага въвеждането на по-точни методи за изчисляване, какъвто е метода на крайните елементи (МКЕ).



Фиг.1.

Целта на настоящата работа е избор на необходимите профили на скелетната конструкция и необходимата дебелина на стъклени панели за осигуряване на безаварийна и безопасна работа на остьклена конструкция на строяща се жилищна сграда в град Пловдив, която представлява пирамидална покривна конструкция с правоъгълна основа (фиг.1). На базата на зададен архитектурен проект и действащата в страната нормативна документация се определят основните атмосферни натоварвания и въздействия. Проектните пресмятания се извършват по утвърдени в практиката методи основани на чужди стандарти и препоръки от водещи производители на стъкло и на системи от профили. Получените конструктивни варианти се моделират и анализират в МКЕ с цел по-пълна и точна оценка на тяхната товароносимост.

Носещата конструкция е изградена от стоманени тръби разположени по ръбовете на пирамидата, съединяващи се при върха ѝ, закрепени към стоманобетонни площи при основата ѝ и на кота +5,70 (спрямо основата на пирамидата). Стените на пирамидата представляват остьклена фасадна стена изградена от алюминиева фасадна система ЕТЕМ Е85 с ромбовидна форма на стъклени панели (фиг. 2).



фиг. 2 Размери на пирамидалната конструкция

3. Натоварвания и въздействия

Определят се по действащи за страната норми и могат да се разделят на следните видове:

- от сняг – действа перпендикулярно на стената и се разпределя по цялата площ в зависимост от региона, но поради големия ъгъл на наклона не се натрупва и това натоварване в случая се пренебрегва.
- натоварвания от собствено тегло – пресмята се според вида на избраните стъклени панели.
- от вятър - Натоварването от вятър действа перпендикулярно върху цялата площ на стената. Стойността му се определя в зависимост от региона, в който е разположена сградата, височината, на която се намира конструкцията спрямо терена и формата и размерите на конструкцията.

Разглежданата конструкция има форма на пирамида с правоъгълна основа. Спрямо стандартите приети за територията на Р. България [1] нормативната стойност на статичната компонента на натоварване от вятър w_n в kN/m^2 на височина z над терена се изчислява по формулата:

$$w_n = w_m \cdot K_z \cdot C \cdot \gamma_z ,$$

w_m – нормативната стойност на налягането (скоростния напор) на вятъра;

$$w_m = 0,41 \text{ kN/m}^2 \text{ (за региона на гр. Пловдив)}$$

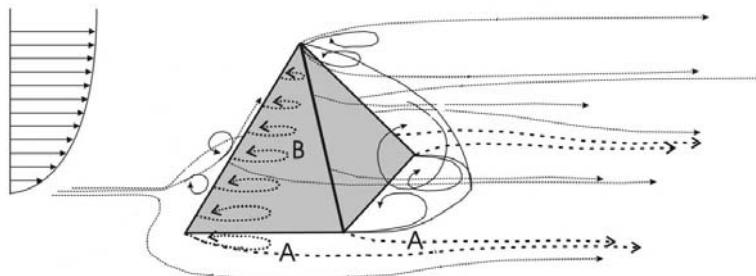
k_z - коефициент, с който се отчита изменението на налягането по височина;
 $k_z = 1,5$

c - аеродинамичен коефициент.

За примера се взима най-голямата определена експериментална стойност [2]; $c = 0.7$.

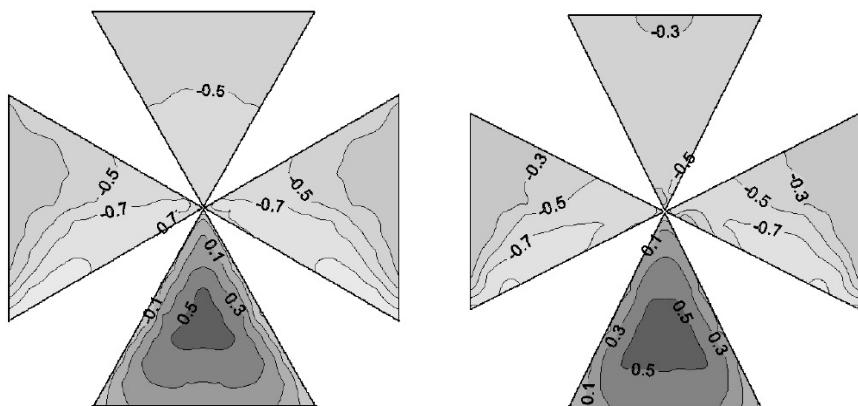
γ_z - частен коефициент за въздействие ($\gamma_z = 1,4$).

В действащите норми за Р България няма регламентирани стойности на коефициента c за пирамидални конструкции затова се използват резултати от проведени експерименти [2], в които се наблюдават специфични завихряния по ръбовете на пирамидата (фиг. 3) като те зависят и от ъгъла на наклона на стените й и посоката на действие вятъра.



Фиг.3

На фиг.4 са показани разпределенията на налягането по повърхностите на пирамиди със стенни ъгли 55° и 60° при най-неблагоприятната посока на ветровото натоварване. Вижда се, че при увеличаване на ъгъла, се увеличават и аеродинамичните коефициенти и с оглед за повишаване на сигурността се избира по неблагоприятния случай (фиг. 4 б)



а) пирамида с стенен ъгъл 55°

б) пирамида с стенен ъгъл 60°

Фиг.4 Ветрови налягания в пирамидални конструкции

След отчитане на всички коефициенти оказващи въздействие от вятър се получава:

$$w_n = 0,41 \cdot 1,5 \cdot 0,7 \cdot 1,4 \quad \text{Приема се: } w_n = 730 \text{ N/m}^2$$

3. Якостно и деформационно оразмеряване на скелетната конструкция

В стандартните методи за изчисляване на елементите на скелета – непрекъснатите (вертикални) и прекъснатите (хоризонтални) се изчисляват поотделно, като греди подпрени на две опори. Не се извършват пресмятания за всеки елемент от фасадата, а само за най-натоварените. Общото натоварване върху конструкцията се задава като равномерно разпределен повърхнинен товар, действащ върху стъклени панели, състоящ се от две компоненти от тежестта на стъкления панел и от ветровото въздействие:

$$q_s = w_n + g \cdot \cos \mu , \text{ където}$$

μ - ъгъла на наклона на стената; $\mu = 64^\circ$

g - обемно тегло на стъклен панел с дебелина 6мм. $g = 0,15 \text{ kN/m}^2$

Приема се: $q_s = 0.8 \text{ kN/m}^2$

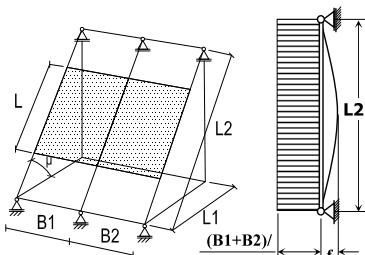
Изборът подходящ профил за напречните елементи е според ASTM E 1300 в зависимост от необходимия инерционен момент, при допустимо провисване между двете опори от H/175. Полученото повърхнинно натоварване q_s се преобразува в линейно равномерно разпределен товар q_1 по зависимостта:

$$q_1 = q_s \cdot \frac{(B1 + B2)}{2} , \text{ където}$$

$B1$ и B – разстояния от разглеждания елемент до съответно левия и десния съседни елементи. $B1=B2=114,6 \text{ cm}$

$$q_1 = 0,8 \cdot \frac{(114,6 + 114,6)}{2} ; q_1 = 0,92 \cdot 10^{-2} \text{ kN/cm}$$

Непрекъснатият (вертикален) елемент се разглежда, като греда подпряна на две опори, която е подложена на специално огъване под действие на разпределен товар с трапецовидна форма (фиг. 5).



Фиг.5. Изчислителна схема за непрекъснат (вертикален) елемент

Уравнението на еластичната линия е :

$$w(x) = \frac{q(L2^3 x - 2L2x^3 + x^4)}{24EJ} , \text{ където}$$

$L2$ - дължина на елемента; $L2 = 850 \text{ cm}$

E - модул на еластичност на алуминий; $E = 7 \cdot 10^9 \text{ kg/m}^2$

J - инерционен момент на сечението на профила.

Търсеното провисване се получава :

$$f = w\left(\frac{L2}{2}\right) - w\left(\frac{(L2-L)}{2}\right) , \text{ където}$$

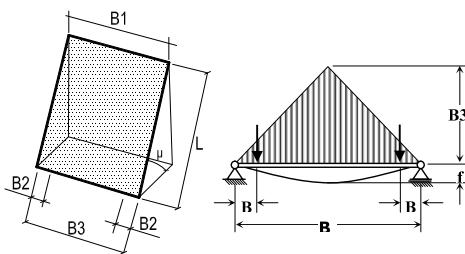
L - височината на стъклопакета. $L=115 \text{ cm}$, а $L1= 565,8 \text{ cm}$.

След заместване се получава:

$$f = -\frac{L^2(-6L1^2 + L^2)q}{384EJ} \leq [f] \text{ следователно за } J \text{ се получава:}$$

$$J \geq -\frac{L^2(-6L1^2 + L^2)q}{384E[f]} \quad J \geq -\frac{1,15^2(-6 \cdot 5,658^2 + 1,15^2)0,92 \cdot 10^{-3}}{384 \cdot 7 \cdot 10^9 \cdot 3,23} \quad J \geq 308,78 \text{ cm}^4$$

От каталога с профили [11] (ETEM E85) се избира профил E85105 с $J = 417,9 \text{ cm}^4$.



Фиг.6. Изчислителна схема на прекъснат (хоризонтален) елемент

Прекъснатите (хоризонтални) елементи са подложени на същите натоварвания като непрекъснатите (вертикални) с разлика в това, че за тях повърхните товари се преобразуват по следния начин:

- от вятър - в триъгълен разпределен товар:

$$q_t = \frac{W_m \cdot B3}{2}, \text{ където}$$

B3 – дължина на ригела. B3=120 cm

$$q_t = \frac{0,73 \cdot 120}{2}; q_t = 0,43 \cdot 10^{-2} \text{ kN/cm}$$

- от тежестта на стъклото – в две съсредоточени сили, приложени в средата на „центриращите“ стъклопакета подложки:

$$F_G = \left(\frac{B3 \cdot L}{2} \right) \cdot g \cdot \cos \mu, \text{ където}$$

μ - ъгъла на наклона на стената ($\mu=64^\circ$);
 L – височина на стъклопакета. $L=115$ cm

$$F_G = \left(\frac{120 \cdot 115}{2} \right) \cdot 0,15 \cdot \cos 64^\circ \quad F_G = 0,04 \text{ kN}$$

Ригела се разглежда като греда на две опори, подложена на специално огъване под действието на разпределен товар (правоъгълен триъгълник) и две съсредоточени сили (фиг.7). Провисванията се получават, съответно :

- от разпределения товар

$$f1 = \frac{q_t \cdot B3^4}{120EJ}$$

- от съсредоточени сили

$$f2 = \frac{F_G B2 (3B3^2 - 4B2^2)}{24EJ}, \text{ където}$$

B2 – разстояние до центъра на подложките. B2 = 15cm

Търсеното провисване се получава :

$$f = f1 + f2 = \frac{-20 \cdot B2^3 \cdot F_g + 15 \cdot F \cdot B2 \cdot B3^2 + q_t \cdot B3^4}{120 \cdot E \cdot J} \leq [f]$$

Необходимия инерционен момент е:

$$J \geq \frac{-20 \cdot B2^3 \cdot F_g + 15 \cdot F \cdot B2 \cdot B3^2 + q_t \cdot B3^4}{120 \cdot E \cdot [f]}$$

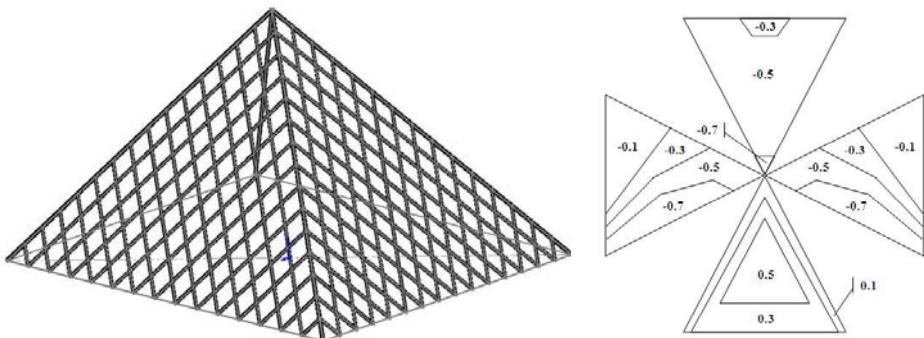
$$J \geq \frac{-20 \cdot 15^3 \cdot 0,04 + 15 \cdot 0,04 \cdot 15 \cdot 120^2 + 0,43 \cdot 10^{-2} \cdot 120^4}{120 \cdot 7 \cdot 10^9 \cdot 0,68}$$

$$J \geq 162 \text{ cm}^4$$

От каталога с профили [11] (ETEM E85) се избира профил E85103 с $J = 168,9 \text{ cm}^4$.

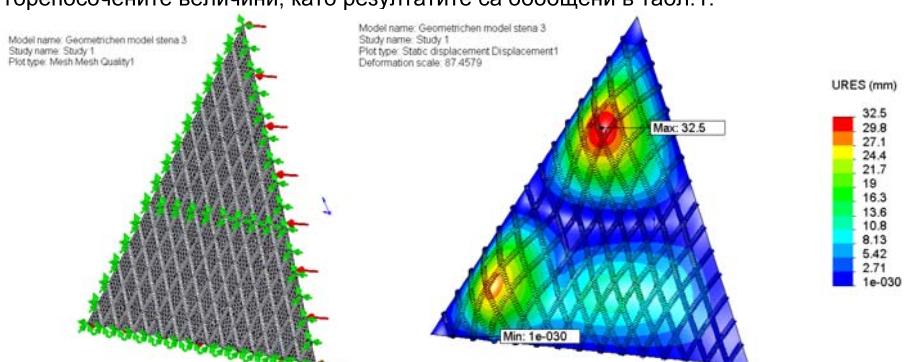
5. Създаване на модел в МКЕ

Изгражда се тримерен геометричен модел в системата Solid Works (фиг. 11) с конкретните параметри на пирамидата (дължина, широчина, височина на страните и ъглите на наклона на стените спрямо основата, като данните се вземат от посочената архитектурна и конструктивна документация на пирамидалната конструкция. В системата Cosmos Works, на базата на зададения геометричен модел се създава модел с черупкови и гредови крайни елементи. Връзките между различните видове КЕ се осъществяват в общи възли. Дефинира се вида на материала за гредовите елементи – алуминий, а за черупковите елементи – стъкло със съответните им характеристики: модул на еластичност, инерционни моменти и др. Задава закрепването на конструкцията в съответствие с реалния й модел, както и натоварването в отделните стени, показано в разпределението на фиг.9 с области на различни стойности и посока на налягането. Създава се мрежа от крайни елементи със определена големина на самите елементи и толеранс между тях. Задава се изследование и получените резултати се анализират спрямо допустимите напрежения $[\sigma]$ за алуминий- 107 MPa и за стъкло – 13,8 MPa.



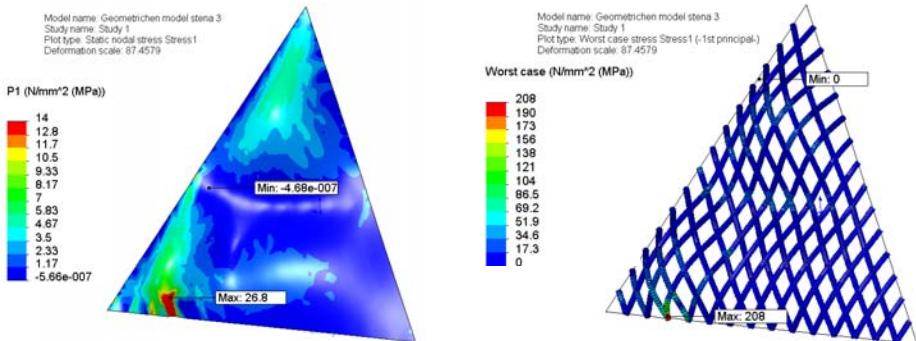
Фиг. 9. Тримерен модел на разглежданата конструкция и опростена схема на натоварването.

Вижда се, че най-натоварени са двете странични стени. По тази причина в настоящата работа са показани резултатите от техния анализ: общите премествания в mm; опъновите напреженията получени в стъклените панели според първите главни напрежения в MPa; напреженията в гредовите елементи в най-застрашените точки в MPa. За останалите стени са взети само най-големите стойности на горепосочените величини, като резултатите са обобщени в табл.1.



Фиг.10 Закрепване, натоварване и КЕ мрежа

Фиг.11 Общи премествания в стена 3.



фиг.12 Напрежения в стъклените панели и напрежения в гредовите елементи.

6. Анализ на резултатите и изводи

На горепосочените фигури са показани преместванията и напреженията в стъклените панели и елементите на скелетната конструкция за всяка от стените. Резултатите са обобщени в табл. 1.

Таблица. 1. Резултати от изследванията с MKE

	Стена 1	Стена 2	Стени 3 и 4	Макс. стойност
Максимално общо преместване, mm	37,3	53,3	32,5	53,3
Максимално напрежение в стъклените площи, MPa	5,34	10,8	13,8	13,8
Максимално напрежение в скелета, MPa	50,17	68,1	208	208

На пръв поглед, преместванията се получават значително по-големи от допустимите по стандартните методи, но следва да се отчете фактът, че се нормират преместванията на скелетната конструкция в рамките на едно поле с цел се изключи участието на стъклените панели в общото огъване на конструкцията. При необходимост е възможно да се изследват относителните премествания на панелите спрямо скелета, но в случая това не е нужно, тъй като в модела се отчита съвместната работа на последните и меродавни са напреженията в стъклото.

Стъклото е крехък материал и за неговата якост се съди по максималните първи главни напрежения. В изследванията се наблюдават големи локални пикове на тези напрежения в местата на връзките между стъклените панели и скелета в близост до точките на закрепване. Това се дължи на прилагането на закрепването в точка и тези пикове могат да се пренебрегнат съгласно принципът на Сен Венан. Освен това, реалното свързване на стъклените панели със скелета не е "твърдо", като в изчислителния модел и отчитането на този факт би довело до значително намаляване на напреженията по ръбовете на стъклото. В таблицата са показани максималните напрежения в области със значителни размери спрямо големината на панелите и достатъчно отдалечени от концентраторите. Вижда се, че максималните напрежения не надвишават допустимите.

За елементите на скелета се разглеждат напреженията в най-застрешените точки в гредовите елементи. Те също се получават в близост до закрепванията, но за разлика от тези при стъклените площи, те не могат да бъдат пренебрегнати. За стени 3 и 4 напрежението е значително и следва да се вземат конструктивни мерки.

От разгледаните методи и получените от тях резултати се налагат следните изводи :

- При решаване на задачата по МКЕ се получава по-точна представа за напрегнатото и деформирано състояние на конструкцията, тъй като се отчита работата на отделните елементи като цяло. Освен това, се отчита и неравномерното разпределение на ветровото налягане по повърхността на стените.
- Проектирането с използваните в практиката методи би могло да осъкни конструкцията, поради високата себестойност на материалите и ограниченията на номенклатури от профили или силно да я застраши.
- Използването на МКЕ трябва да се извършва внимателно с оглед създадените модели и последващия анализ и при необходимост да се създават по-точни модели.

7. Литература

1. Наредба №3 от 21.07.2004 за основните положения за проектиране на конструкции на строежи, ДВ 92 бр. 2004г.
2. Muhhamad Ikhwan, Flow and Pressure Field Characteristics around Pyramidal Buildings, Karlsruhe 2005
3. ASTM E 1300 – 3, Standard Practie for Determining the Load Resistance of Glass in Buildings, ASTM International, West Conshohocken, 2003.
4. Beason, W. L., Morgan, J. R., Glass Failure Prediction Model, J. of Structural Engineering, Vol. 111, No. 9 2058-2059, 1985.
5. Beason, W. L., Kohutek, T. L., Bracci, J. M., Basis for ASTM E 1300 Glass Thickness Selection Procedure, Civil Engineering Department, Texas A & M University, 1996.
6. Beason, W. L., Kohutek, T. L., Bracci, J. M., Basis for ASTM E 1300 Annealed Glass Thickness Selection Charts, J. of Structural Engineering, Vol. 124, No. 2 215-221, 1998.
7. Vallbhan, C. V. G., Wang, B. Y., Nonlinear Analysis of Rectangular Glass Plates by Finite Difference Method, Inst. for Disaster Res., Texas Tech University, Lubbock, 1981.
8. Weibull, W., A Statistical Theory of the Strength of Materials, Ingenjörsvetenskapsakademiens, Handlanger, NR 151, Stockholm, Sweden, 1939.
9. Д. Велчев, Приложение на метода на крайните елементи за изчисляване на неносеща скелетна фасадна стена, Русе
10. E85, ETEM S.A., Magoula, Attiki.
11. Saflex® Architectural Structural Guide
12. Процедура по определянето на товароносимостта на стъклени панели по ASTM E 1300, Д. Велчев, Нели Стойкова

За контакти:

Владимир Тотев, студент IV курс, специалност “Машиностроителна техника и технологии”, Русенски университет “Ангел Кънчев”

гл. ас. Димитър Велчев, катедра “Техническа механика”, Русенски университет “Ангел Кънчев”, Тел.: 082 888224, E-mail: dvelchev@ru.acad.bg.

Получаване на ултрадисперсно-структурни технически чист алюминий и изследване на механичните му свойства

автор: Мариета Станоева

научен ръководител: доц. д-р Росен Радев

Abstract: *Fabricating and investigation of mechanical properties of ultrafine-grained aluminum. The ultrafine-grained metallic materials have been widely investigated during the past years. This paper discusses in brief the related deformation techniques for batch and continuous processing and describes some preliminary results for aluminium deformed by equal channel angular pressing.*

Key words: ultrafine-grained metallic materials, aluminium, ECAP

ВЪВЕДЕНИЕ

Ултрадребнозърнестите метални материали са широко изследвани през последните години с оглед на възможностите за различни индустриални приложения на техните подобрени механични и технологични свойства. Постигненията от 1990 г. насам са публикувани по света в хиляди научни статии и доклади [1-3] и в няколко десетки съвременни монографии, справочници и учебни пособия. Между традиционните конструкционни кристални материали с големина на зърната над 1-10 μm и функционалнитеnanoструктурирани материали съществува интересната международна област на ултрадребнозърнестите материали с размери на кристалитите в интервала 100-1000 nm или 0,1-1 μm.

Създаването на обемни ултрадребнозърнести и nanoструктурирани материали може да се извърши „отдолу нагоре“ (когато обектите се изграждат чрез създаване и консолидиране на техните структурни елементи – компактиране на прахове с дисперсна структура, отлагане на дебели дисперсни покрития и др.) или „отгоре надолу“ (когато се въздейства по подходящи начини върху предварително изградени обекти чрез интензивно пластично деформиране, термомеханично обработване или кристализация от аморфно състояние). Първият подход включва интензивно пластично деформиране, термомеханично обработване и кристализация от аморфно състояние, а към втория подход се отнасят основно компактирането на прахове с диспергирана структура и отлагането на дебели дисперсни покрития. Тук се визират само метални сплави, обработени чрез интензивно деформиране, което се осъществява по различни методи. Тук се визират само метални сплави, обработени чрез интензивно деформиране, което се осъществява по различни методи [10-20].

В приложен аспект обработването на металите и сплавите чрез интензивно пластично деформиране осигурява редица съществени предимства, основните от които са следните:

- значително се повишават както механичните (якост, твърдост, жилавост), така и технологичните (например при свръхпластично деформиране и микрообработване) и експлоатационните (издръжливост, топлоустойчивост, биосъвместимост) свойства на конструкционните метални материали;
- създаването на свръхдисперсна структура в монолитни изходни материали изключва рисковете при консолидиране на частици с подобна структура в обемни изделия (действия с опасни нанопрахове, остатъчна пористост, нарастване на зърната при компактиране);
- могат да се произвеждат изделия с достатъчно големи размери, подходящи за различни индустриални приложения в машиностроенето и уредостроенето.

Многобройните изследвания [11, 15-25] върху структурата и свойствата на ултрадребнозърнестите метални материали показват, че те се отличават с много добро съчетание от повишена твърдост и якост при достатъчно висока пластичност поради формирането предимно на високъглови граници между силно издребнените зърна при специфичните условия на интензивно пластично деформиране чрез плъзгане. Такова съчетание дава благоприятни възможности за приложението им в различни области на машиностроенето като конструкционни материали, особено при по-строги изисквания към масата на изделията. Освен това ултрадребнозърнестите метални материали показват подходящи експлоатационни и технологични свойства и за други индустриални приложения. В обобщен вид могат да се посочат следните иновативни направления за по-широко използване на редица групи от тези материали в инженерната практика:

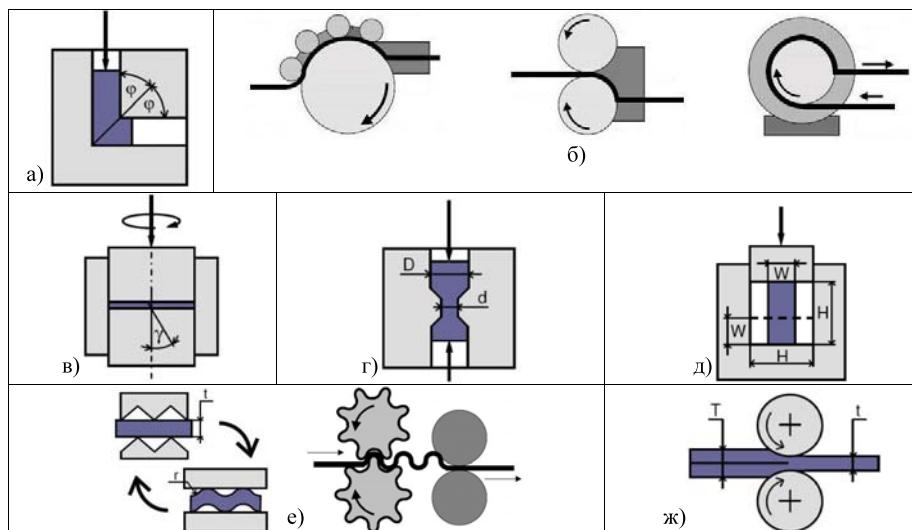
- като специфични конструкционни материали в транспортното машиностроение, производството на спортни стоки, отбранителната индустрия и др.;
- като традиционни сплави с памет на формата при подобreno експлоатационно поведение на изделията;
- като традиционни свръхпластични материали при по-ефективни технологични режими за обработване чрез листово и обемно деформиране;
- като специфични материали за микропроизводство чрез рязане и пластично деформиране при повищено качество на изделията;
- като традиционни материали в медицината за усъвършенствани хирургични и стоматологични изделия с повишени експлоатационни свойства.

Съществуващите методи за интензивно пластично деформиране са твърде разнообразни по схеми на въздействие и необходима екипировка за осъществяването им. По-широко използваните от тези методи (фиг. 1) са следните:

Ёсукване под високо налягане (high pressure torsion, HPT) на дискове в открити и закрити инструменти. Използват се и варианти за деформиране на цилиндри (с цел по-лесно изработване на пробы за механични изпитвания) и на пръстени (за намаляване неравномерността на деформацията);

Ёравноканално ъглово пресоване (equal channel angular pressing, ECAP) на кръгли или квадратни пръти, на плоски изделия и на тръби. Предложени са различни варианти на процеса според конструкцията на инструмента (брой, пространствено разположение и тъъл на пресичане на каналите, брой поансони, наличие на подвижни стени) за дискретни изделия и според начините за силово подаване и отвеждане на непрекъснати изделия;

- циклично пресоване и сплескане (cyclic extrusion-compression, CEC) със силно противоналягане на дискретни цилиндрични изделия;
- циклично затворено сплескане (cyclic closed-die forging, CCDF) на квадратни къси пръти в закрит инструмент;
- повтарящо се рифелование и изправяне (repetitive corrugation and straightening, RCS) на плоски дискретни изделия в открити и закрити инструменти или на ивици с последователни валци и принудително гофриращо сплескане (constrained groove pressing, CGP) със следващо изправяне на плоски изделия в закрити инструменти;
- натрупващо свързване чрез валцована (accumulative roll bonding, ARB) на листови материали с 50% редукция на дебелината;



Фиг. 1. Схеми на интензивно пластично деформиране: а – ECAP, б – варианти на ECAP за непрекъснати изделия, в – HPT, г – CEC, д – CCDF, е – RCS за дискретни и непрекъснати изделия, ж – ARB.

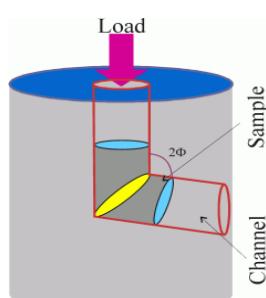
- винтово пресоване (twist extrusion, TE) с противоналягане на квадратни пръти и уширяващо пресоване (spread extrusion, SE) с противоналягане на пръти с правоъгълно и овално сечение;
- многостренно коване (multi-directional forging, MDF) на цилиндрични изделия чрез сплескване и удължаване при повишени температури.

Най-широко приложение намира методът на равноканално ъглово пресоване на кръгли или квадратни пръти, на плоски изделия и на тръби (ECAP), поради възможността за лесна реализация и за производство на сравнително големи образци. Недостатък на гореспоменатите методи е недостатъчното им съвършенство и невъзможността за получаване на големи количества ултрадисперсно-структуритирани материали и образци с подходящи за индустриалното производство размери.

ПОЛУЧАВАНЕ НА УЛТРАДИСПЕРСНО-СТРУКТУРИРАН ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТ АЛУМИНИЙ

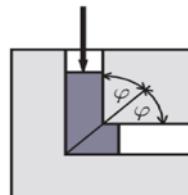
Същността на метода е представена на фиг.2. Тук характерно за многопреходното натрупване на деформации е това, че всеки следващ преход се извършва със смяна на посоката на вздействие спрямо деформираното тяло, което означава промяна на кристалографските системи на пълзгане (на микrorавнище) и завъртане на главните оси на тензора на напреженията (на макrorавнище), като на мезоравнище зърната последователно се раздробяват без появя на обемни дефекти (пори или пукнатини) поради наличието на достатъчно високо налягане.

Обработвания материал е технически чист алуминий. Химическия му състав е посочен в Таблица 1. За получаване на ултрадребнозърнеста структура е проектиран и изработен инструмент, който е представен на фиг.3. Размерите на канала са показани на фиг.4. Първоначалните размери на заготовките са 70 x 9.9 x



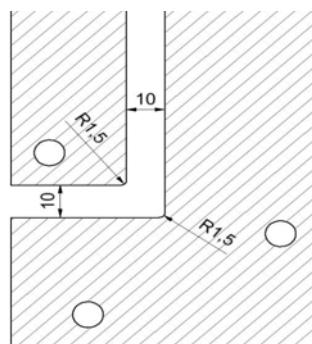
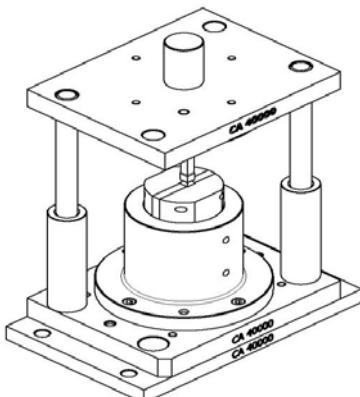
Equivalent plastic strain

$$\varepsilon = n \frac{2}{\sqrt{3}} \cot g \Phi$$



Equal Channel Angular Pressing (ECAP)

Фиг. 2. Метод ECAP



Фиг.3 Инструмент за равноканално ъглово пресоване

Фиг.4 Размери на канала

9.9mm. Заготовките преминават шест пъти през инструмента, като при всеки преход се въртят на 90° . След преминаване през инструмента за шести път натрупаната деформация е над 1000%.

Error!

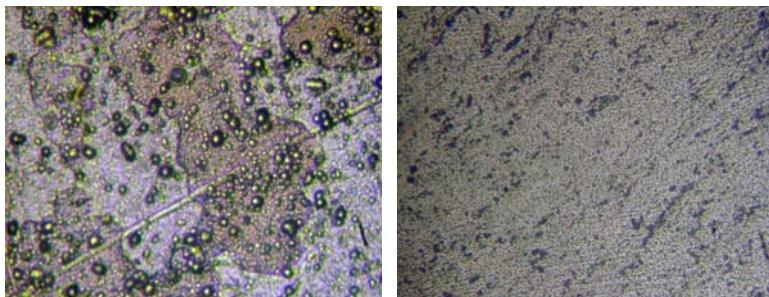
Таблица 1 Химичен състав на технически чист алуминий

Химичен елемент	Si	Fe	Mg	Cu	Al
Съдържание	0.3242	0.2173	0.0829	0.1725	Остатък

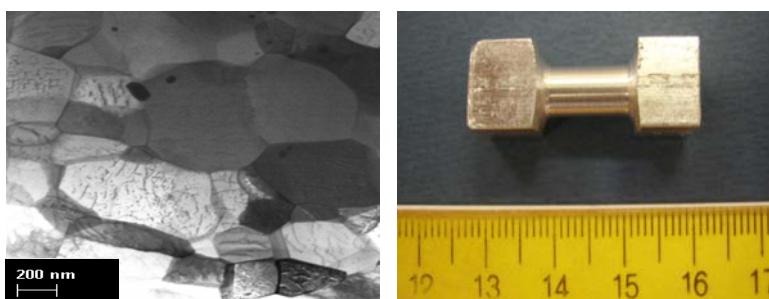
МЕХАНИЧНИ СВОЙСТВА И МИКРОСТРУКТУРА НА УЛТРАДРЕБНОЗЪРНЕСТ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТ АЛУМИНИЙ

Промените в микроструктурата на недеформирания и деформирания алуминий могат да се наблюдават на фиг. 5. Подгответните микрошлифове от недеформиран чист алуминий могат да се наблюдават и чрез оптичен микроскоп, докато при деформирания алуминий това вече е невъзможно. По тази причина

микрошлифовете от деформираният вече алуминий се изследват при голямо увеличение на сканиращ електронен микроскоп (Фиг.6). Това изследване доказва че след деформиране, чрез шесткратно преминаване през инструмента за ECAP, размерът на зърната на алуминия преминава в скалата на ултрайдисперсно-структуритираните материали.



Фиг.5 Микроструктура на недеформиран (ляво) и деформиран, след шест прехода през инструмента (дясно), технически чист алуминий (увеличение x600).



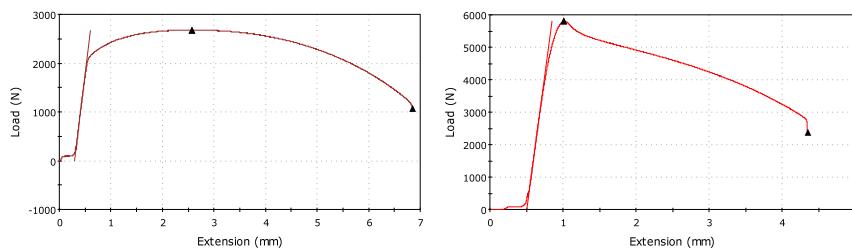
Фиг. 6 Микроструктура на технически чист алуминий след деформиране (увеличение x16000)

Фиг. 7 Проба за изпитване на опън от деформиран алуминий

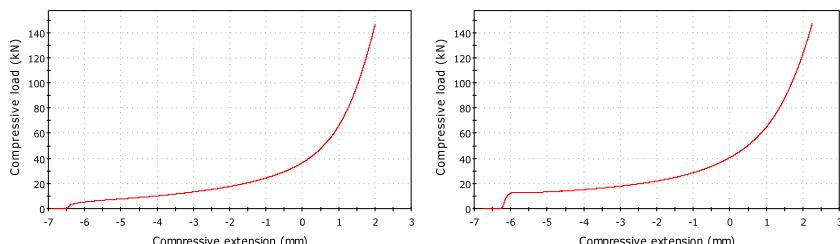
Проведени са тестове на опън и на натиск, както в деформирано, така и в първоначално състояние на материала, с цел получаване на данни и отчитане на промяна в механичните свойства на изучаваните материали. Получените резултати от тестовете са поместени в Таблица 2 и са показани на фиг.8 и фиг. 9. Проба за изпитване на опън, направена от деформиран алуминий, е показана на фиг.7.

Таблица 2 Механични характеристики на технически чист алуминий

Вид материал	Якостни изпитвания				Твърдост	
	R _m , MPa	σ _b , MPa	A _g , %	A ₅ , %	HBS 15,6/2,5/30	HMV, 0,05
Преди деформация	94,3	37,9	35,1	96,2	21	21
След ECAP деформация	198,5	81,7	12,7	54,4	44	45



Фиг.8 Криви $F-\Delta L$: а) Изпитване на опън преди деформация; б)Изпитване на опън след ECAP деформация



Фиг.9: Криви $F-\Delta H$: а) Изпитване на натиск преди деформация ; б) Изпитване на натиск след ECAP деформация

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обработката, чрез ECAP е много ефективна при получаване на ултрадисперсно-структурнизиран технически чист алуминий. След обработка на изпитвания материал се установяват значителни промени в микроструктурата и механичните свойства.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Тихоновский М. и др. Наноматериалы: анализ тенденций развития на основе данных об информационных потоках. Вопросы атомной науки и техники, 2003, 13, 103-110.
- [2] Кожухаров В. Наноматериалы и технологии – състояние и стратегии за развитие. Научни труд. на РУ „Ангел Кънчев”, Русе, 2008, 47, 8, 19-28.
- [3] Гагов В. и др. Някои тенденции в изследването и приложението на ултрабреднозърнести метални материали. Междун. конф. „Авангардни материали и обработки”, Кранево, 2009, 1, 119-126.
- [4] Valiev R. et al. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. Progress in Materials Science, 2000, 45, 2, 103-189.
- [5] Alexandrov I., R. Valiev. Developing of SPD processing and enhanced properties in bulk nanostructured metals. Scripta Materialia, 2001, 44, 1605-1608.
- [6] Olejnik L., A. Rosochowski. Methods of fabricating metals for nano-technology. Bulletin of the Polish Academy of Science in Technical Sciences, 2005, 53, 413-423.
- [7] Verlinden B. Severe plastic deformations of metals. J. of Metallurgy, 2005, 11, 3, 165-182.

- [8] Rosochowski A. Processing of metals by severe plastic deformation. Solid State Phenomena, 2005, 101, 13-22.
- [9] Valiev R. et al. Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation. JOM, 2006, 58, 4, 33-39.
- [10] Лякишев Н., М. Альмов. Наноматериалы конструкционного назначения. Российские нанотехнологии, 2006, 1, 71-81.
- [11] Валиев Р. Созданиеnanoструктурных металлов и сплавов с уникальными свойствами, используя интенсивные пластические деформации. Российские нанотехнологии, 2006, 1, 208-216.
- [12] Azushima A. et al. Severe plastic deformation processes for metals. CIRP Annals, Manufacturing Technology, 2008, 57, 2, 716-755.
- [13] R. Valiev. Recent developments of severe plastic deformation techniques for processing bulk nanostructured materials. Materials Science Forum, 2008, 579, 1-14.
- [14] Ji Y., J. Park. Development of severe plastic deformation by various asymmetric rolling processes. Materials Science and Engineering, 2009, 499, 14-17.
- [15] Koch C. Optimization of strength and ductility in nanocrystalline and ultrafine grained metals. Scripta Materialia, 2003, 49, 7, 657-662.
- [16] Vedani M. et al. Ultrafine grained alloys produced by severe plastic deformation: microstructural control and mechanical behaviour. Metallurgical Science and Technology, 2004, 22, 21-30.
- [17] Valiev R. Paradoxes of severe plastic deformation. In: Nanomaterials by Severe Plastic Deformation, Wiley VCH, Weinheim, 2004, 109-117.
- [18] Kurzydlowski K. Microstructural refinement and properties of metals processed by severe plastic deformation. Bulletin of the Polish Academy of Science in Technical Sciences, 2004, 52, 4, 301-311.
- [19] Huang X. et al. Hardening by annealing and softening by deformation in nanostructured metals. Science, 2006, 312, 249-251.
- [20] Meyers M. et al. Mechanical properties of nanocrystalline materials. Progress in Materials Science, 2006, 51, 4, 427-556.
- [21] Zrnik J. et al. Processing of metals by severe plastic deformation – structure and mechanical properties respond. Metalurgija, 2008, 47, 211-216.
- [22] Zhu T. et al. Performance and applications of nanostructured materials produced by severe plastic deformation. Scripta Materialia, 2004, 51, 9, 825-830.
- [23] Xu C. et al. Severe plastic deformation as a processing tool for developing superplastic metals. J. of Alloys and Compounds, 2004, 378, 27-34.
- [24] Hoppel H. et al. An overview: Fatigue behaviour of ultrafine-grained metals and alloys. Int. J. of Fatigue, 2006, 28, 9, 1001-1010.
- [25] Valiev R. et al. Superplasticity in nanostructured materials: new challenges. Materials Science and Engineering A, 2007, 463, 1, 2-7.

За контакти:

Мариета Станоева, Русенски университет „Ангел Кънчев”, специалност ТММ, студент IV курс, e-mail: marieta_stanoeva@abv.bg

Росен Радев, Русенски университет “Ангел Кънчев”, Катедра “Материалознание и технология на материалиите”, тел.: 082 888 778, e-mail: rradev@uni-ruse.bg

Корозионно-защитни свойства на многослойни покрития Cr-C/Cr-N/Cr върху стомана X12M

автор: Анелия Тодорова
научен ръководител: доц. д-р Диана Цанева

Abstract: Corrosion-protection properties of multilayered Cr-C/Cr-N/Cr coatings deposited onto X12M steel. Objects of the present work are multilayered Cr-C/Cr-N/Cr coatings on X12M steel, deposited at three different temperatures. The corrosion behavior of coated samples was investigated in two model medias: 3% NaCl and 0,5 M HCl.

Key words: Multilayered coatings, Corrosion protection, Magnetron sputtering.

ВЪВЕДЕНИЕ

Днес няма област, в която да не се употребяват черни и цветни метали, и където да не съществува опасност от тяхното корозионно разрушаване под въздействие на заобикалящата ги среда.

В редица промишлени отрасли, особено в химическата промишленост, енергетиката, металургията и др., поради усложнените условия на експлоатация (силно агресивни среди, високи температури, налягания и скорости на потоците), надеждността и експлоатационният живот на съоръженията се определят главно от противящите корозионни процеси.

Един от методите за защитата на металите от корозия, е чрез нанасяне на покрития. Основава се на намаляване степента на термодинамична нестабилност, чрез изолиране на металната повърхност от непосредствен контакт с агресивната среда. Покритията могат да бъдат едно-, дву- или многослойни; с адхезионна или дифузионна връзка с основния метал, или изцяло дифузионни. Разнообразието от използвани покрития е много голямо, което налага внимателен избор. Изборът на покритие се определя от природата на защитавания метал, условията на експлоатацията му и от икономическата целесъобразност [1].

За получаване на покритие с желани свойства, основна роля имат методът и параметрите на отлагане на покритиято. Те определят структурата и свойствата му, както и връзката покритие - подложка. През последните две десетилетия усилено се изследват вакуумно отложени покрития, съдържащи хромови нитриди, карбиди и карбонитриди. В настоящата работа е разгледано корозионното поведение на многослойни покрития Cr-C / Cr-N / Cr, отложени върху стомана X12M.

МЕТОДИКА НА ЕКСПЕРИМЕНТА

Покритията са отложени във вакуумна експериментална пещ ВЕП 1, чрез постояннотоково магнетронно разпрашване на синтерована мишена от хром с чистота 99,998%. Преди отлагането на покритията, подложките са почистени в аргонов тлеещ разряд при температура 550°C и потенциал, подаван на подложките -900 V при налягане $1,5 \times 10^{-1}$ mbar и дебит на аргона 11,44 sccm. За получаване на хромов слой в продължение на 10 min е разпрашвана мишната в аргонов разряд. Дебитът на аргона през целия процес е поддържан 11 sccm. Карбидният слой е отлаган в продължение на 40 min, като за получаването му в камерата е натичан метан с дебит 7 sccm. За отлагане на нитридния слой, след спиране натичането на метана, в работната атмосфера е вкаран азот с дебит 8 sccm. След отлагане на покритията, образците са оставени да се охладят заедно с пещта. Образците, които използваме са 2.1.4, 2.4.1, 2.6.4, съответно покритията върху тях са отложени при температури 450, 550 и 650°C. Разстоянието „мишена-подложка”, на което са били разположени, е L t-s = 70 mm.

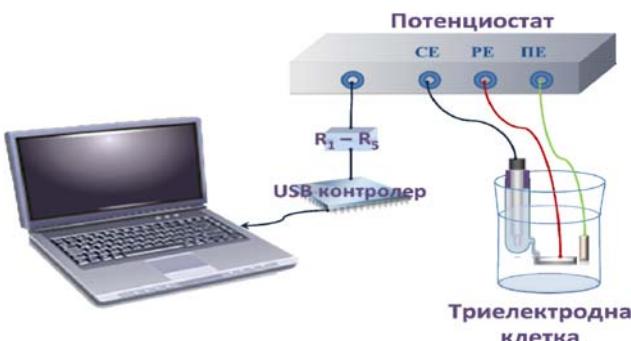
Измерването на дебелината на покрития от Cr-C / Cr-N / Cr е извършено с помощта на металографски микроскоп EPYTIPER 2 с окуляр микрометър върху напречен шлиф, проявен с 3% HNO₃, с обектив x50 и x100. Таблица 1 [2] показва, че с повишаване на температурата на отлагане на покритията, дебелината им намалява. Този ефект може да се обясни с улесненото разпращаване на атоми от израстващата повърхност на покритията при повищени температури, както и със склонността на хрома да сублимира. Намаляването на дебелината е най-силно за карбидния слой.

таблица 1[2]

Дебелина на покрития Cr-C / Cr-N / Cr			
Температура на отлагане, °C	Покритие/слой	Горно ниво	
		Образец №	Дебелина μm
450	Общо	2.1.4	14.5
	δ ₂ Cr-C		6.48 / 6.5
	δ ₁ Cr-N		5.99 / 6
	δ _{Cr} Cr		1.99 / 2
550	Общо	2.4.1	13.61 / 13.6
	δ ₂ Cr-C		5.83 / 5.8
	δ ₁ Cr-N		5.56 / 5.6
	δ _{Cr} Cr		2.13 / 2.2
650	Общо	2.6.4	12.76 / 12.8
	δ ₂ Cr-C		5.35 / 5.4
	δ ₁ + δ _{Cr} Cr-N+Cr		7.41 / 7.4

δ₂ – външен слой; δ₁ – среден слой; δ_{Cr} – вътрешен слой;

Като агресивна среда при изучаване на корозионно-защитната способност на покритията са използвани 3%-ен воден разтвор на NaCl и 0,5 M HCl. Площта от образците, изложена на въздействието на средата, е 0,4 cm².



Фиг. 1 -

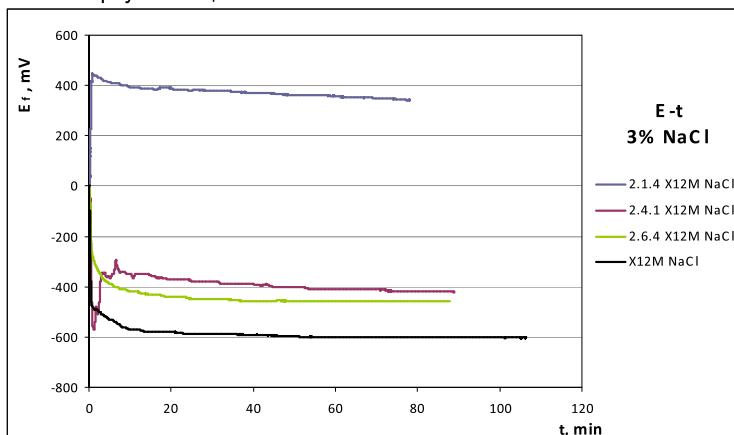
Компютъризирана система за електрохимични изследвания на корозионното поведение на метални материали с и без покрития с оглед проследяване изменението на електрохимичните данни в реално време и запис на информацията в цифров вид; CE - присъединяване на сравнителния електрод; RE - присъединяване на работния електрод – образец; PE – присъединяване на противоелектрода .

Заштитните свойства са определени с помощта на компютъризирана система за ускорени електрохимични тестове (фигура 1), разработена в катедра МТМ на РУ. След престой в електролита до установяване на стационарен потенциал ($E-t$), са снети потенциодинамични криви (ПДК) на покритите образци при потенциал на външна поляризация, изменящ се в границите от -600 mV до +1200 mV със скорост 1mV/s. Използвана е триелектродна клетка с наситен каломелов електрод и платинов противоелектрод. Външният потенциал е задаван с потенциостат RADELKIS-OH-405. С помощта на електронна таблица се изчертават графики със снетите резултати в координати „свободен потенциал E_f , mV – време t , min“ и „плътност на тока i , mA/cm² – потенциал на външна поляризация E , mV“.

РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИИ

1. Корозионно поведение в 3 % NaCl

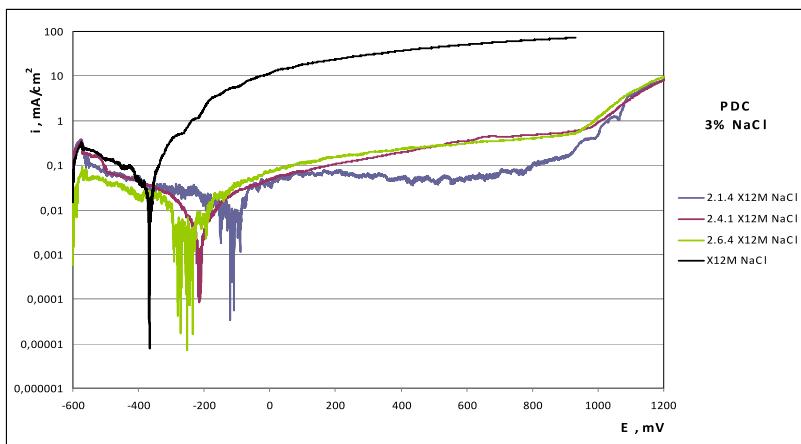
На фигура 2 са обобщени кривите „свободен потенциал - време“ на пробите с покритие и непокрита стомана в 3% NaCl. В таблица 2 са показани стойностите на стационарния потенциал в тази агресивна среда. Свободният потенциал и стационарният потенциал на X12M без покритие, имат най-ниски стойности. Покритията, формирани при температура 550 и 650 °C, повишават потенциала на системата „покритие-подложка“ с около 200 mV, докато покритието, отложено при най-ниската температура 450°C, рязко изменя потенциала в положителна посока, така че E_{ct} . (проба 2.1.4) е +342mV. Повишаването на температурата не влияе благоприятно върху потенциала.



Фиг. 2 Изменение на свободния потенциал на образци с покрития и на непокрита стомана X12M в 3% разтвор NaCl

таблица 2

Проба	3 % NaCl			0,5 M HCl		
	E_{ct} , mV	$E_{кор.}$, mV	i , mA/cm ²	E_{ct} , mV	$E_{кор.}$, mV	i_a , mA/cm ²
X12M	-385	-367	23	- 225	-224	27
2.1.4	+587	-119	0,07	- 154	-208	2
2.4.1	-176	-212	0,09	- 67	-323	0,03
2.6.4	-215	-252	0,12	- 196	-216	4



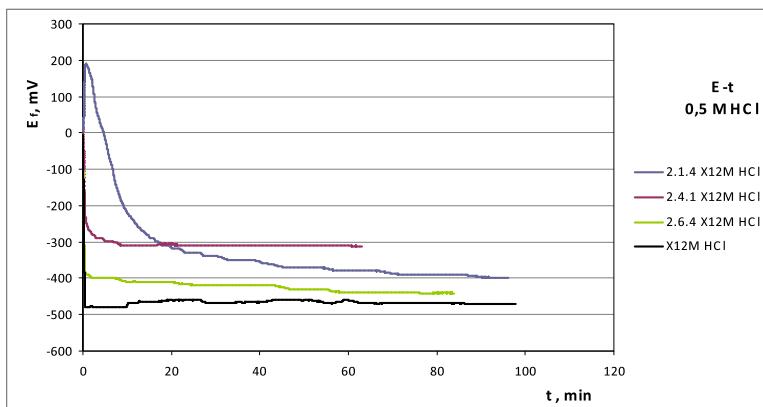
Фиг. 3 Потенциодинамични криви на образци с покрития и на непокрита стомана X12M в 3% NaCl

Поведението при външна поляризация в 3% NaCl е илюстрирано от потенциодинамичните криви, показани на фигура 3. Стомана X12M се разтваря активно в тази среда, което се изразява в прогресивно нарастващо на тока на анодно разтваряне при увеличаване степента на анодна поляризация. При потенциал +1000 mV плътността на тока достига почти 100 mA/cm^2 . ПДК на проби 2.4.1 (550°C) и 2.6.4 (650°C) показват затруднено анодно разтваряне до потенциал на транспасивация (около $+950 \text{ mV}$), при който плътността на анодния ток достига стойности около 0.6 - 0.7 mA/cm^2 . Двете покрития демонстрират близки защитни свойства. Известни, но слабо изразени, предимства показва покритието, отложено при температура 550°C . Покритието, получено при 450°C , отмества най-забележимо потенциала на корозия. Потенциодинамичната крива на проба 2.1.4 (450°C) е характерна за самопасивирана повърхност – плътността на тока се запазва в ниски граници, и дори показва тенденция към намаляване в областта на потенциали на външна поляризация от $+200$ до $+560 \text{ mV}$, свързвано с доизграждане на пасивния слой. В тази област анодният ток е в границите 0.042 - 0.072 mA/cm^2 . Очевидно е, че най-добри защитни свойства притежава покритието, нанесено при 450°C , тъй като запазва устойчива пасивност до $+785 \text{ mV}$, и понижава плътността на анодния ток с почти три порядъка. Най-вероятната причина за доброто поведение на пробата с покритие, получено при 450°C , е максималната повърхностна концентрация на хром, обусловена от по-малката скорост на сублимация.

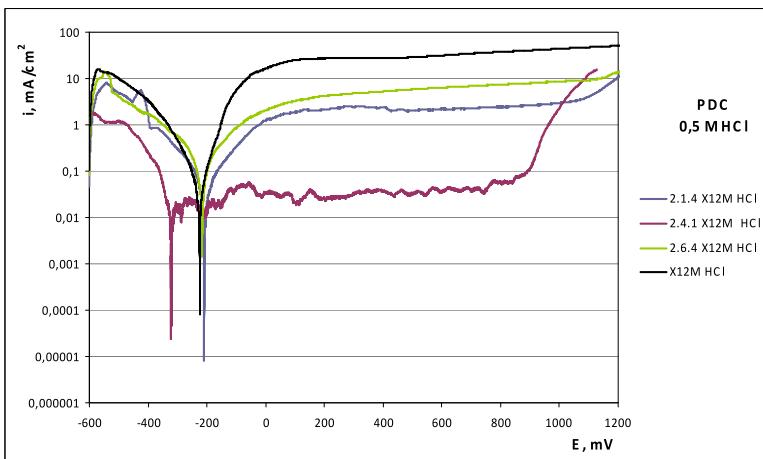
2. Корозионно поведение в 0,5 M HCl

На фигура 4 са представени кривите „свободен потенциал – време“ на пробите с покритие и на непокрита стомана в 0,5 M HCl. В таблица 2 са обобщени стойностите на стационарен потенциал в тази агресивна среда. Най-ниски стойности на свободния и на стационарен потенциали са отчетени за непокрита стомана. С най-висок стационарен потенциал е пробата с покритие, нанесено при 550°C , което показва повишена термодинамична устойчивост, очевидно дължаща се на най-благоприятна структура на покритието, формирано при тези условия.

Най-лоши защитни свойства демонстрира пробата с покритие, отложено при 650°C .



Фиг. 4 Изменение на свободния потенциал на образци с покрития и на непокрита стомана X12M в 0,5 M HCl



Фиг. 5 Потенциодинамични криви на образци с покрития и на непокрита стомана X12M в 0,5 M HCl

Поведението при външна поляризация на стомана X12M без и с покрития в 0,5 M HCl е илюстрирано от потенциодинамичните криви, показани на фигура 5. В тази среда за стомана X12M се наблюдава активно анодно разтваряне при увеличаване степента на анодна поляризация до +140mV, след което разтварянето се забавя поради дифузационни ограничения на електрохимичните процеси, предизвикани от натрупване на корозионни продукти върху повърхността. Проби 2.1.4 (450°C) и 2.6.4 (650°C) показват затруднено анодно разтваряне до потенциала на транспасивация. Двете покрития са с близки защитни свойства. Покритието, отложено при 450°C, показва известни предимства, обяснени и за неутралната среда.

Най-значително понижение на анодния ток предизвиква покритието, отложени при 550°C. За тази проба (2.4.1, 550°C) е получен най-нисък потенциал на корозия, което може да се обясни с облекченото протичане на катодната реакция на отделяне на водород върху нейната повърхност (най-стръмна катодна крива).

Насцентният водород е добър редуктор, който разрушава изцяло пасивния слой, възникнал на въздух. Следващото увеличаване на дълбочината на анодна поляризация изгражда пасивен слой с най-добри защитни свойства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изследвано е влиянието на температура на отлагане (450, 550 и 650°C) върху корозионно-защитните свойства на покрития Cr-C/Cr-N/Cr върху стомана X12M в две моделни корозионни среди: 3% разтвор NaCl и 0,5 M HCl. От извършеното изследване е установено, че:

- 1) Покритията на порядъци понижават тока на анодно разтваряне и преместват потенциала на системата „покритие – подложка” в положителна посока, с което повишават термодинамичната и корозионната устойчивост;
- 2) Температурата на отлагане влияе слабо върху дебелината на покритията, и не тя е решаваща за защитната им способност.
- 3) В 3 % разтвор на NaCl, най-добра защитна способност показва покритие, отложено при температура 450°C, а корозионното поведение на стомана с покрития, нанесени при 550 и 650°C, не се отличава съществено.
- 4) В 0,5 M HCl най-добрата защитна способност демонстрира покритие, получено при 550°C.

Използвана литература

- [1]. Кънев М., Технологии за нанасяне на покрития, Русе 1986 г.
- [2]. Илиева М., Д. Цанева, Е. Янков, Структура, микротвърдост и корозионно-защитни свойства на покрития Cr-C/Cr-N/Cr, отложени върху стомана 9ХС, Машиностроение и машинознание, година V, книга 3, ТУ Варна, 2010.

За контакти:

Доц. д-р Диана Цанева, Катедра “Материалознание и технология на материалите”, Русенски университет “Ангел Кънчев”, тел.: 082-888 307, e-mail: dvc@uni-ruse.bg.

Анелия Димитрова, специалност „Технология на материалите и материалознание”, Русенски университет „Ангел Кънчев”, e-mail:aneliq.t.dimitrova@gmail.com.

Магнетронно отложени еднослойни TiN покрития върху стомана 9ХС при температура на подложката Тп = 100 °C без термично и йонно почистване

автор: Любомир Георгиев

научни ръководители: доц. Ив. Дерменджиев, д-р инж. В. Захариева

Abstract: In this study an opportunity for obtaining a hard and wear-resistant TiN coating monolayer on 9XC steel (DIN 90CrSi) substrate at a comparatively low deposition temperature is proposed. The coating phase composition and mechanical behavior are determined by the X-ray analysis and scratch tests. The results display that the flown nitrogen quantity during deposition do not change the coating phase composition but its chemical composition, textural characteristics and mechanical properties.

Keywords: magnetron sputtering (MS), TiN coating, 9XC steel

ВЪВЕДЕНИЕ

Напоследък голямо внимание се отделя за създаване на нови технологии и технологични схеми с цел подобряване качеството на машинните детайли и металообработващите инструменти.

Многообещаващ в това отношение метод е този на физичното отлагане от парова фаза и по-точно магнетронното отлагане на покрития.

В световната практика TiN покрития (еднослойни и многослойни) се отлагат чрез магнетронно разпращане при температури на подложката около или малко над 100 °C [3, 5].

Магнетронно могат да бъдат отложени титан-нитридни покрития, както върху метални, така и върху неметални подложки.

Еднослойните вакуумни покрития на титанова основа отложени чрез PVD методи са сравнително евтини и могат да се използват в редица процеси за механична обработка на изделия, като показват висока плътност, адхезия, и добра износостойчивост.

В Научния Център по Вакуумни Технологии и Съоръжения се работи активно по получаването и изследването на покритията на базата на TiN и TiC. Разработват се както "стандартни" покрития, така и многослойниnanoструктурирани, градиентно ориентирани и аморфни покрития. Използват се магнетронно разпращане и електродъгово изпаряване по отделно и в комбинация. Особено внимание се обръща на влиянието на параметрите на получаване върху състава, структурата и свойствата [1].

ЦЕЛ на настоящата работа е: да се изследва възможността за получаване на еднослойни магнетронно отложени TiN покрития върху стомана 9ХС при температура на подложката Тп = 100 °C без термично и йонно почистване.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ЧАСТ

Методика на експеримента

Покритията са нанесени върху образци с размери $d = 20$ [mm] и $h = 6$ [mm] от стомана 9ХС (C -0.85÷0.95%; Mn- 0.30÷0.60%; Si-1.20÷1.60%; Cr-0.95÷1.25%). Преди нанасяне на покритията е проведена стандартна механична обработка за стомани – шлифоване и полиране.



Фиг.1 ВЕП-1 – външен вид



Фиг. 2 Магнетронен разряд

Мишената е изработена от техническа титанова сплав BT3-1 (Ti-89.5288%; Al-5.7718%; Cr-1.4205%; Mo-2.3636%; Fe-0.38275; Si-0.2806%). Използвана е еднокамерна вакуумна пещ, оборудвана с небалансиран DC магнетрон (фиг. 1 и 2).

Нагревното пространство е ограничено от топлоизолационна камера, изолирана с графитова вата и молибденови екрани. Нагряването на изделияята се осъществява от цилиндричен графитов нагревател с размер $\phi = 200$ mm и $H = 150$ mm и възможност за достигане до 1350°C [6].

Технологичният режим включва начално вакуумиране до $7,2 \times 10^{-3}$ и $9,3 \times 10^{-3}$ mbar, като преди нанасяне на покритията не се извършва нагряване на подложките.

Работното налягане по време на отлагане на покритията е $7 \div 9 \times 10^{-3}$ mbar в атмосфера от Ar-14 sccm и N₂ – 3 и 7 sccm за времена от 64 и 80 min при средна мощност на разпращаване 2 kw.

Параметрите на проведените режими са представени обобщено в таблица № 1.

Режими на отлагане на TiN покритие върху стомана 9ХС Таблица 1

Режим №	Pнач. [mbar]	Pраб. [mbar]	U [V]	I [A]	G _{Ar} [sccm]	G _{N2} [sccm]	T o [C]	ВРЕМЕ [min]
3	7.2×10^{-3}	7.0×10^{-3}	319	4.1	14	3	90	64
4	9.3×10^{-3}	9.1×10^{-3}	340÷370	4÷5.2	14	7	110	80

*ЗАБЕЛЕЖКА: За всички режими потенциалът на подложките U_п е бил плаващ.

Посочените параметри осигуряват скорост на кондензация 0,008-0,18 $\mu\text{m}/\text{min}$ при разстояния мишина - подложка L_{МП} = 75 и 90 mm.

Методика на изследванията

Извършен е качествен рентгеноструктурния анализ на рентгенов дифрактометър "URD – 6" в Fe-K_α лъчение с дължина на вълната $\lambda=1,93728\dots[\text{\AA}]$

Рентгенограмите са представени в цифров вид и са оформени таблици с фазовия състав на покритията (фиг.3).



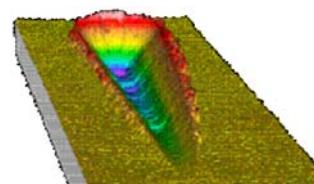
(1)

Фиг. 3. Рентгенов дифрактометър “URD-6”

Адхезионната и когезионна якост са определени по най-разпространения метод (Scratch test) с помощта на специализирания уред CSEM-REVETEST® (Швейцария) в условията на кат. MTM в РУ “Ангел Кънчев” гр.Русе (фиг. 4, 5).



Фиг. 4. Scratch-тестер CSEM-REVETEST®:



Фиг. 5. Профил на повърхността след скрач-тест

ИЗЛОЖЕНИЕ

Фазов състав и текстура

Резултатите от рентгеноструктурния анализ в обобщен вид са представени в таблици 2. и 3. и на фиг.6 а/, б/, в/.

Поради малката дебелина на покритията в рентгенограмите се индентифицират линиите на основното покритие TiN и тези на подложката – αFe твърд разтвор. При това линиите на нитрида са сравнително слаби и единични, а за образец Г4 наличието на тази фаза е установено след изследване с послоен химичен GDOES анализ, проведен в по-късно време. Това се дължи на сравнително малката дебелина на покритията – около 1,0 – 1,5 μm, поради което те са на границата на рентгеновата видимост на апаратурата.

Таблица 2

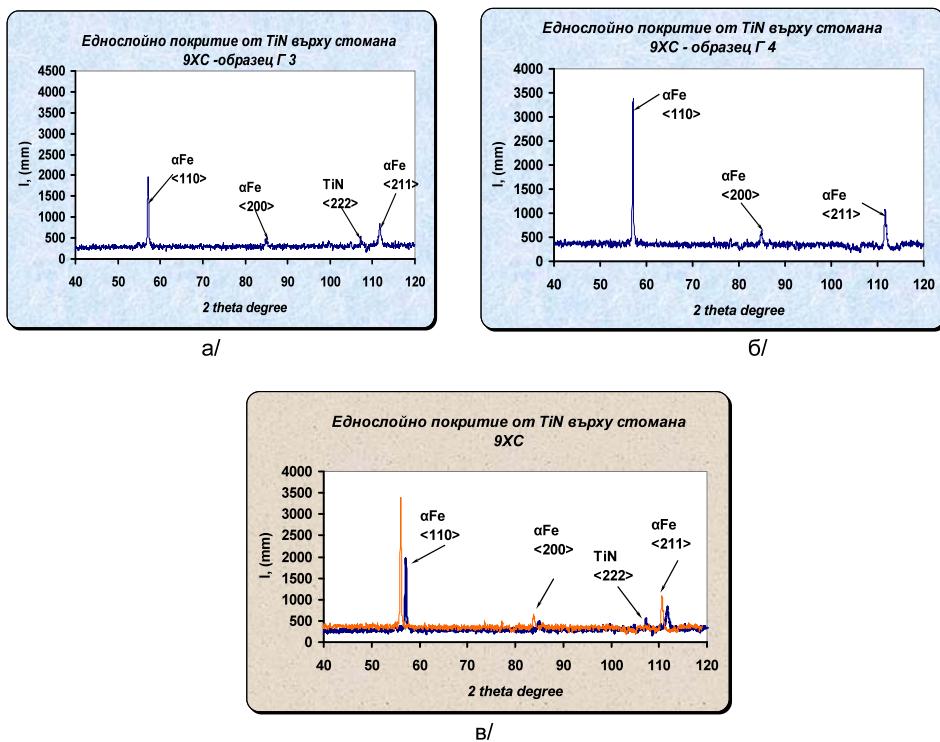
Образец - Г 3 - 9ХС							
№	2θ/изм.	θ /табл.	d/n теор.	I изм/mm	I табл.%.	HKL	фаза
1	57,25	28,65	2,03	1638	100	110	αFe
2	85,25	42,62	1,43	214	20	200	αFe
3	107,25	53,62	1,2	130	12	222	TiN
4	111,9	55,95	1,17	519	30	211	αFe

Таблица 3

Образец - Г 4 - 9ХС							
№	2θ/изм.	θ /табл.	d/n теор.	I изм/mm	I табл.%.	HKL	фаза
1	57,2	28,6	2,03	3015	100	110	αFe
2	85,05	42,52	1,43	300	20	200	αFe
3	111,7	55,85	1,17	691	30	211	αFe

В допълнение е възможно поради малкото количество на азота в работната среда вероятно покритието да представлява смес от αTi и TiN, като количеството на втората фаза да е много малко.

Това допълнително затруднява откриването на нитрида. В случая промяната на количеството азот в изследваните граници не влияе върху фазовия състав на покритията.



Фиг. 6. Рентгенограми на покритията

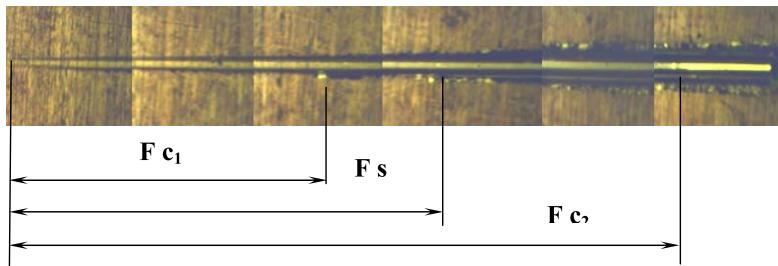
От обобщената фигура 6 в/ се вижда, че фазите и при двата образеца се появяват на едни и същи ъгли с малки отмествания и с изключение на TiN фаза, дължащо се най - вероятно на моментната промяна в мощността на рентгеновото лъчение.

От само себе си се разбира, че покритието Г3 е силно текстурирано, тъй като РА /рентгеноструктурният анализ/ е регистрирал само една линия на фазата на TiN.

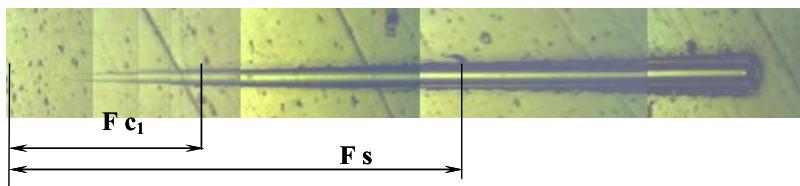
Адхезионна и кохезионна якост

Адхезионната и кохезионната якости на покритията са определени комплексно по метода „Scratch-test“. Основни показатели на адхезионната и кохезионна якости представляват критичните натоварвания: F_{c1} - появя на първите частични откъртвания по повърхността на покритието (показател на кохезионната якост на покритията), F_s - на частично напукване в дълбочина до границата слой/подложка (комплексен показател едновременно на адхезионната и кохезионната якост) и F_{c2} - на разрушаване (при над 50% напълно отделено от подложката покритие в основата на следата) - показател на адхезионната якост на връзката слой/подложка.

Покритията са изследвани с прогресивно натоварване от 50 N/mm, за двата режима (фиг.7 и 8).



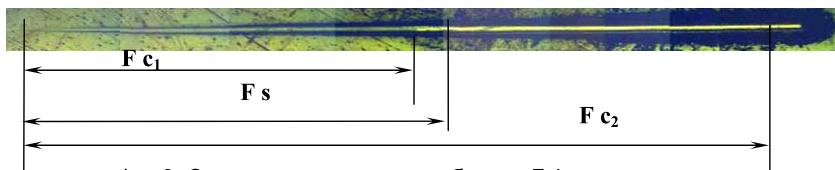
Фиг.7. Следа от скрач-тест на образец Г 3



Фиг.8. Следа от скрач-тест на образец Г 4

Тъй като изследването на образец Г4 не показва наличието на силата на разрушение F_{c2} , бе направен още един експеримент с прогресивно натоварване от 100 N/mm. Разрушение се наблюдава, юдва при тази по-висока стойност на натоварването (фиг. 9) [2, 4].

При подобни изследвания в катедрата, по-голямото количество азот /разбирај надстехиометрично по състав покритие/, образците са имали по-лоши показатели. Явно в случая количеството на азота е в някакви граници, които са далеч от надстехиометричния състав.



Фиг.9. Следа от скрач-тест на образец Г 4 – втори опит

Промяната в химичният състав оказва влияние върху степента на текстурисваност и оттам върху твърдостта и износостойчивостта.

Комбинацията от тези два фактора се оказва по-благоприятна за образец Г-4.

Прегледа на данните на режимите на отлагане на TiN покрития показва, че освен промяната в химичния състав със сигурност са оказали влияние и температурата и времето на отлагане, колкото и малки да са разликите в двата режима.

ИЗВОДИ

1. Рентгеноструктурният анализ показва, че количеството азот, натичан при отлагане на покритията не оказва влияние върху фазовия им състав. И в двата случая те са изградени от TiN и а-Ті твърд разтвор.

2. Независимо че рентгеноструктурният анализ не показва наличие на TiN фаза за образците от 4 режим, дори с невъоръжено око можем да докажем нейното наличие. Съществуването на тази фаза се потвърждава и от микроструктурният анализ. Явно поради малката дебелина на покритията количеството ѝ в общия обем на пролъчване е под рентгеновата видимост.

3. Много добра адхезия и кохезия на покритията се дължи на количеството газ, натичан при отлагането им. Той оказва влияние и върху вида и степента на текстурисваност и състава на образците. Комбинацията от тези два фактора е по-благоприятна за образец Г-4.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дерменджиев Ив., Дисертация за ОНС „Доктор” – 1995 г.
- [2] Захариева В., „Скрач-тест и корозионна устойчивост на многослойни покрития от типа TiN/TiC... и TiC/TiN... отложени върху подложка 9ХС” том 45, серия 2.1, 2006, 121 стр.
- [3] Захариева В., Дисертация за ОНС „Доктор” – 2008 г.
- [4] Йорданов М. Дисертация за ОНС „Доктор” – 2003 г.
- [5] Kawamura M., Kumagai K., Abe Y., Sasaki K. And Yanagisawa H. "Characterisation of TiN films prepared by rf sputtering using metal and compound targets", Pergamon, Vacuum, vol.51 (1998) pages 377-380.
- [6] Шишков Р. „Вакуумно дифузионно метализиране“ Дисертация, РУ"А.Кънчев", Русе, 2004 г.

За контакти: Любомир Георгиев, задочно обучение V курс, специалност МТМ, МТФ, Русенски университет “Ангел Кънчев”, e-mail: liubomir.georgiev1970@abv.bg

доц. Иван Дерменджиев, Катедра “Материалознание и технология на материалите”, Русенски университет “Ангел Кънчев”, тел.: 082-888 204, e-mail: ivadim@uni-ruse.bg

д-р инж. Ваня Захариева, Катедра “Материалознание и технология на материалите”, Русенски университет “Ангел Кънчев”, тел.: 082-888 317, e-mail: yzaharieva@uni-ruse.bg

**Разработване на мултимедийно пособие
за онагледяване на лабораторни упражнения
по дисциплината „Термична обработка на материалите“**

автор: Моника Кулева
научен ръководител: ст.ас. Данаил Господинов

Abstract: In this work, a multimedia appliance for laboratory exercises' visual illustration in the subject "Heat Treatment of Materials" is submitted. An opportunity of supplementation the subject of various schemes, photos and videos of real equipment for thermal processes and their conduction is proposed.

Key words: heat treatment, multimedia, multimedia systems

ВЪВЕДЕНИЕ

Съвременният живот се характеризира с бурно развитие във всички сфери на дейност. Висок скок бележи размахът на компютърните технологии, които заемат все по-важно място в ежедневието на човека. Никой не би си представил съвременния свят без мултимедия. Тя обогатява съвременната информация и създава приложения в образоването, реклами, видеоДИСТРИБУЦИЯ и др.

Мултимедията, обединявайки различните видове медиа като текст, говор, видео, анимация, графика, музика и др., дава възможност на потребителя да получи по-богата и пълна информация за всяко събитие, което е представено с помощта на тези средства. С помощта на мултимедията потребителят с по-малко труд усвоява повече информация отколкото, ако я получава само от текстов документ.

Интересът към мултимедията и обучаващите мултимедийни приложения (ММП) се дължи на факта, че те:

- позволяват учебното съдържание да се структурира в нива и поднива, т. е. да се изгради йерархична структура, съобразена с поставените цели за хоризонтална и вертикална интелектуализация. По този начин се задоволяват изискванията както на широк кръг от обучаемите, тези използвани съдържанието под подход при усвояване на знанията, така и на тези, за които е характерен повърхностния такъв;

- обединява в себе си медии, които въздействат върху различни сензорни канали и които формират положително ефективно състояние – фон, на който се осъществява образователно-възпитателният процес. Крайният ефект е не само висок процент на усвояемост на новостта, но и формиране на естетически вкус на обучаемия;

- позволява диалог с обучаемия, което дава възможност за избор, прекъсване и повторение, т.е. за промяна на хода на операциите. Тази възможност за обратна връзка и контрол върху потока на информация провокира активността на обучаемия, осигурява индивидуален подход за изследование и запаметяване и гарантира индивидуален ритъм за усвояване на информацията;

- позволява реализиране на следните основни принципи на обучението: нагледност и атрактивност с включване на всички сензори на обучаемия [1].

Очакванията и мотивацията на днешните студенти поставят нови изисквания относно начина на поднасяне и онагледяване на преподавания материал. Използването на мултимедийни продукти в процеса на преподаване и обучение по дисциплината „Термична обработка на материалите“ е перспективно, поради възможността, както за представяне на материала по лесен и атрактивен начин, така и за усвояването на основните задачи, с които ще се сблъскат обучаващите. Този вид представяне на материала позволява на преподавателя за кратко време да запознае студентите с нужната информация. Възможността за включване на снимки

и видео позволяват запознаване със съоръжения, машини и оборудване характерно за термичните отделения, както и онагледяване на термични операции, което до голяма степен намалява нуждата от посещения в производствени условия свързани с организация, пътуване, допълнително време и средства, което в някои случаи е трудно и дори невъзможно. Така се спестява време за излагането на материала и се създава възможност за по-обширни дискусии по дисциплината.

Основна цел на настоящата работа е създаване на мултимедийно пособие онагледяващо и обогатяващо лабораторните упражнения по дисциплината „Термична обработка на материалите“.

Постигането на така поставената цел е възможно след решаване на следните задачи:

- избор на базов софтуерен продукт за реализиране на пособието;
- разработване на идейна схема за изграждане на упражненията в помагалото и събиране на снимков материал, видео и други материали разширяващи и обогатяващи лабораторните упражнения по дисциплината;
- разработване на пособието в два варианта – за студенти редовно и задочно или дистанционно обучение.

ОПИСАНИЕ И КРАТКО СЪДЪРЖАНИЕ НА ПОМАГАЛОТО

СХЕМА ЗА ИЗГРАЖДАНЕ НА ПОМАГАЛОТО

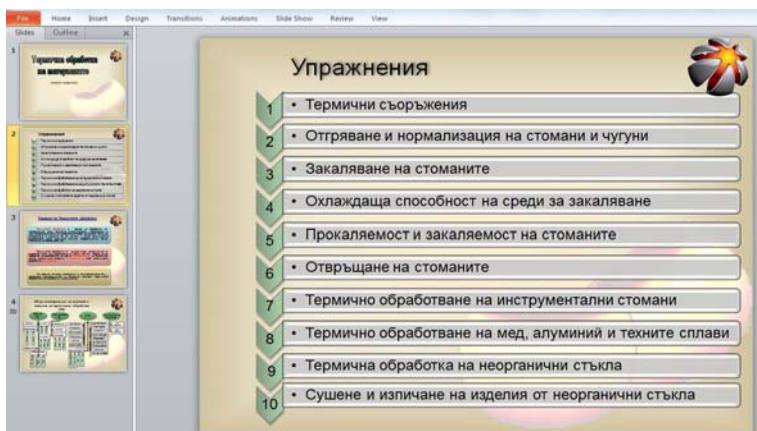
Материалът в разработеното помагало е представен с помощта на програмния продукт Microsoft PowerPoint и е предназначен за обучение по дисциплината „Термична обработка на материалите“ на студентите от инженерните специалности на Русенския университет, като е съобразен с учебната програма. Мултимедийното пособие е част от проект за изграждане на система за обучение, включваща в себе си, както лекционен материал така и упражнения, онагледени с множество илюстрации, снимки, графики, таблици, видео и др.

Създаденото помагало има определена йерархична структура. В литературата са описани три вида структури (потокови диаграмми), използващи се при създаване на мултимедийни обучаващи курсове за дистанционно обучение: дървовидна, стълбовидна и йерархична.



Фиг.1 Начална страница на пособието

На фиг.1 може да бъде видяна началната страница на разработеното пособие. Обединяващ елемент за всички упражнения е страницата със съдържанието на помагалото (Фиг.2), зареждаща се непосредствено след началната и даваща възможност за избор на желана тема. Това става посредством активен текст и води до извеждане на избраното упражнение на экрана. Връщането към тази страница се реализира чрез бутон за бърз достъп, наличен на всяко изображение в помагалото .



Фиг.2. Съдържание на учебното помагало



Фиг.3 Схема на изграждане на упражненията в помагалото

За всяко едно от упражненията е приложена еднаква схема на изграждане (Фиг.3). Изключение прави упражнение №1 – „Класификация на съоръженията в термичните цехове“, което акцентира вниманието на студентите върху основните (за нагряване), допълнителните (вани за охлаждане) и спомагателните (подемни устройства, машини за измиване и т.н.) съоръжения използвани в термичните отделения. Състои се от 8 таблици, които класифицират термичните съоръжения по

различни признания. В случаите, когато към текста поместен в таблицата има фотос или видео той е активен. При кликане с левия бутон на мишката върху него се отваря страницата със съответната допълнителна информация. Различните видео клипове в помагалото показват съоръженията при реалното им използване в термичните цехове и предприятия. Многобройните снимки и клипове дават на студентите ясна представа за вида и начина на използване на съоръженията (Фиг.4).



Фиг.4 Снимки представящи общия вид на камерни електрически пещи

В началото на останалите теми студентите се запознават с целта на упражнението и с теоретичните основи на предвидените за разглеждане термичните операции или процеси. Това е възможно с помощта на няколко прозореца, съдържащи обобщена теоретична информация. На всяка страница има връзки, отварящи поясняващи страници, таблици, графики, изображения, микроструктури и др. даващи по-задълбочена информация за конкретния въпрос (Фиг.5). Допълнително са поставени и бутони предназначени за осигуряване на нелинейността на демонстрирането на презентацията, изразяваща се във възможността за придвижване напред или назад в упражнението или прехвърляне към съдържанието.



Фиг.5. Елемент от Упражнение 2 „Отгряване и нормализация на стоманите“

След поставяне на задачите решавани в лабораторната част на съответното упражнение то продължава с методична част, в която се изясняват всички условия за провеждане на предвидените експерименти (режими, съоръжения и т.н.) и видът и формата на представяне на получаваните резултати (таблици, схеми, диаграми и др.). Тази част е обогатена и със снимки на опитните уредби, използвани в даденото упражнение, както и с фотоси на съоръжения и приспособления използвани в реални производствени условия при изпълняване на подобни операции. Също така са включени и прецизни, цифрови изображения на микроструктури, получавани като резултат от съответните термични операции. Накрая се анализират получените резултати и въз основа на тях се оформят съответните изводи.

В края на всяко от упражненията предвидени за дистанционно обучение е наличен и интерактивен тест за проверка и затвърждаване на получените знания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основните резултати от създаването на мултимедийното пособие могат да се обхванат със следните констатации:

- Формирана е идея и е разработено пособие създаващо възможност за онагледяване на целта, задачите, теорията, методиката и основните резултати за всяко едно от упражненията по термична обработка на материалите;
- Създадена е информационна база, върху която е възможно да се добавят материали, както и да се разширяват и доусъвършенстват разработените лабораторни упражнения;
- Изгответеното помагало може да се приеме за основна рамка при бъдещо доизграждане на модул за дистанционно обучение по дисциплината;
- Предложените структура, форма, съдържание и цветово представяне на всяка отделна тема облекчава реалното възприемане на материала по дисциплината от студентите.

Създаденият мултимедиен продукт ще спомогне за:

- онагледяване, разширяване и задълбочаване на знанията по термична обработка на материалите;
- повишаване на интереса към дисциплината, създаване на мотивация за учене и потребност от самостоятелност;
- облекчаване на взаимодействията между преподавател и студент при дистанционно обучение по дисциплината.

ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.kakvo.org/osnovni-ponyatiya-i-istoriya-na-multimediyata/multimediya/statia>
2. Иларионов, Р., Мултимедия и web дизайн. ТУ-Габрово
3. Данев, П., Термична обработка на материалите. Русе-2001

За контакти:

Моника Кулева, специалност „Технология на материалите и материалознание”,
Русенски университет „Ангел Кънчев”,
E-mail: mony_kz@abv.bg
Ст ас. Д.Господинов, катедра „Материалознание и технология на материалите”,
Русенски университет „Ангел Кънчев”

Вакуумно оксикарбонитрирани галванични покрития от желязо и хром върху подложка от никловъглеродна стомана и армко желязо

автор: Снежанка Димитрова

научен ръководител: проф. Пламен Данев

Abstract: In this study the microstructural and microhardness characteristics of the iron and chromium electrolytic coatings together with their substrates are compared. There is a significant difference in the diffusion kinetics of the specimens because of the chemical difference and consistence of the coatings. As a result the straightening effect of the substrates due to the nitrides' presence is diverted.

Key words: thermo-chemical treatment, oxy-nitrocarburizing, electrolytic iron, electrolytic chromium

Въведение

Подобряването на износостойчивостта на детайлите и повишаването на корозионната им устойчивост е възможно чрез съвременни вакуумни методи за азотиране, карбонитриране и оксикарбонитриране. Под въздействието на никлото налягане от активната атмосфера азотни и въглеродни атоми дифундират в структурата на метала, като го пресищат, образуват нови фази и повишават неговата твърдост, якост на опън и умора, както и други свойства. Твърдите фази в структурата на повърхностния слой са нитриди, карбиди и карбонитриди. При дифузията на атомарния азот в желязото се образуват твърди разтвори - азотист ферит (α_N) и азотист аустенит (γ_N), както и няколко фази на внедряване от вида γ' - Fe_4N , ϵ - $Fe_{2-3}N$ и ξ - Fe_2N фаза, като така се формира многофазен дифузионен слой. Известно е, че разтворимостта на азота в твърдия разтвор на хрома е незначителна [1].

Целта на настоящия доклад е установяване изменениета в структурата и някои свойства на чистите метали желязо и хром получени металургично и чрез електролиза, както и на подложките под тях, след износостойчиво вакуумно оксикарбонитриране.

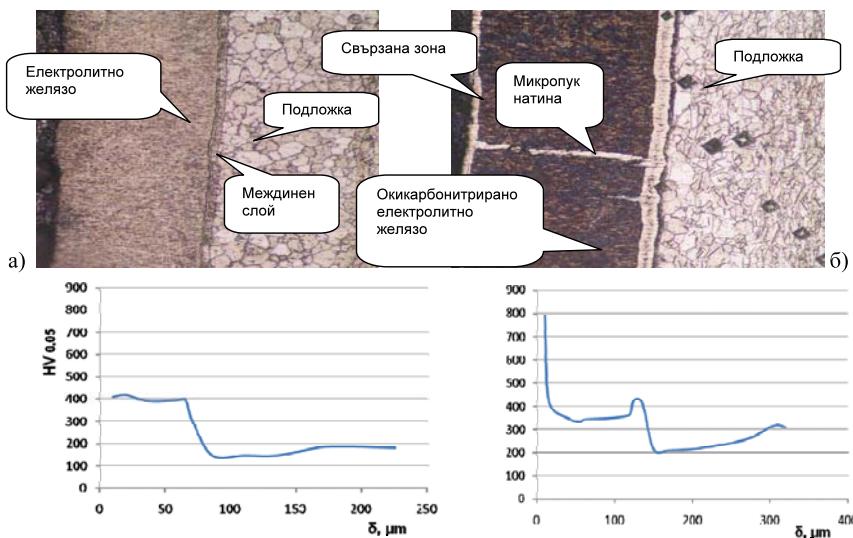
Методика на изследването

Използвани са пробни тела от електролитно желязо, нанесено върху подложки - пластини от армко желязо и стомана 08kp (AISI 1008). Пробните тела от армко желязо, върху които са отложени покрития от хром в чисто състояние с приблизителни размери $\varnothing 20 \times 10$ mm. След нанасяне на покритието пробите се шлифоват и полират. Те се подлагат последователно на оксикарбонитриране при температура на операцията 570 °C. Повърхностната твърдост на пробните тела се измерва по метода на Викерс (HV₁). Използван е преносим твърдомер марка "Krautkramer" произведен в Германия. Микротвърдостта на пробните тела се измерва върху проявената микроструктура на покритието, свързаната и дифузионна зони посредством микротвърдомер ПМТ-3.

Пещта за оксикарбонитриране е шахтова, произведена от Ф. "Елпром" Балчик, с фирмено означение СШЦ 4,5.9/9,5 и мощност 35 kW. Ретортата е заварена конструкция от огнеупорна стомана на Ф. "Вакуумтерм" В. Търново. Използвана е листова ламарина X18H9T. Вакуумната уредба се състои от пет основни елемента: пещ и реторта, вакуумираща система, охладителна система, управление и газово стопанство [2].

Резултати и обсъждане

На фиг.1 са съпоставени и показани профилите на микротвърдостта в дълбочина на слоя и микроструктурата в напречен разрез на електролитното желязо и на подложката от стомана 08kp преди и след оксикарбонитриране.



Фиг.1. Микротвърдост и микроструктура ($x200$) на електролитното желязо и подложката от 08kp след напластвяване (а) (твърдост на повърхността $HV_1=600$), и след оксикарбонитриране (б) ($HV_1=630$).

Образуваната на повърхността свързана зона след оксикарбонитриране изглежда светла и е с дебелина около $10\mu m$. Микротвърдостта, която е измерена в този слой средно е $790\text{ HMV}_{0.05}$. Вижда се, че в дифузионната зона на електролитното желязо тя е по-ниска, но преди и след оксикарбонитрирането почти не се различава ($350 - 400\text{ HMV}_{0.05}$). Промяната в микротвърдостта при оксикарбонитрираното желязо се дължи от една страна на частичното релаксиране на високите напрежения от II и III род в изходната структура, а от друга – на присъствието на уячаващи нитридни фази, които са изключително фини, но за присъствието им може да се съди по променения цвет на желязото. Съществена е разликата в измерената твърдост на подложката под покритието след насищането, което показва, че насищане има и там. Между покритието и подложката се очертава междинния слой от меко желязо, нанесен при ниска плътност на асиметричен променлив ток за по-добра адхезия. Плътността на метала в слоя спрямо зоната над нея е много по-висока, а структурата е по-малко напрегната. На фигурата е показано също, че в тази зона при неоксикарбонитрираното желязо има понижение на твърдостта, докато при насищеното в последствие – тенденцията е противоположна. Получененият светъл цвят на междинната нерекристализирана зона напомня цвета на карбонитридата свързана зона. Вероятно този междинен слой е определено бариера за навлизашите от желязото дифундирани атоми и там концентрацията им е повишена. В дълбочина на подложката се наблюдават нитридни пластиини (игли) от Fe_4N и то не само в близост до междинния светъл

слой, но и на по-голяма дълбочина. Това е показано на фигура 2, където са сравнени най-вече подложките от стомана 08kp, съответно преди и след насищане с C, N и O. Понижението на микротвърдостта в подложката в близост до междинния железен подслой в сравнение с микротвърдостта в дълбочина, е резултат от протеклата рекристализация, довела до разячаване на видимо деформираните преди операцията зърна, както е илюстрирано на фиг. 2.



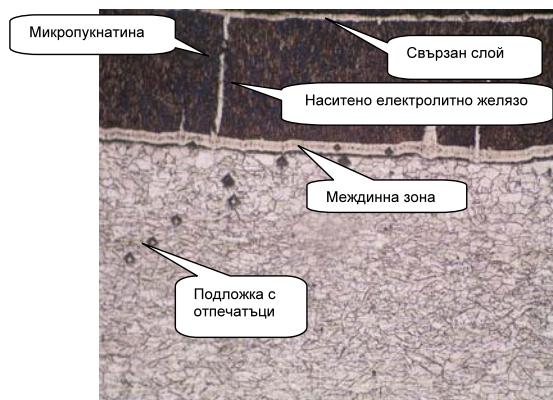
Фиг. 2. Микроструктура на подложката преди и след оксикарбонитриране (x200).

На фигура 3 е показано, че измерената микротвърдост в дълбочина на подложката се запазва на разстояние 150 μm от светлата зона, нанесена за добра адхезия, а от микроструктурата се вижда, че дълбочината, на която са видими нитридни пластиини, е около два пъти по-голяма (над 300 μm). Повърхностният железен слой със своята ултрайдисперсна и пореста структура катализира насищането на подложката. Известно е, че вида на изходната структура силно повлиява на насищането с C и N [3]. Електролитният железен слой вероятно играе роля на ускорител за навлизането в подложката активни азотни атоми. Трябва да се отчете още и факта, че при нисковъглеродните стомани дифузията на азота и въглерода е улеснена, но при силна дисперсност на структурата [4, 5]. За това спомагат и дефектите в студено пластично деформираните зърна в повърхността на пластиината от 08kp, чиято гранична повърхност е силно развита. Присъствието на тези дефекти се доказва от рекристализиралата повърхностна зона в подложката, чиято микротвърдост нараства след оксикарбонитрирането от наличието на уякчаващите нитридни пластиини.

Електролитните покрития от хром се характеризират с ултрайдисперсен строеж и висока плътност /фиг.4/. Измерената повърхностна твърдост надвишава HV₁~1000. След отгравяне при 600 °C твърдостта намалява до 650 HV₁. Предполага се, че хромовото покритие съдържа незначителни количества водород, който се отделя при оксикарбонитрирането.

С азота хромът образува два нитрида: Cr₂N (11,3 - 11,9 % азот,) като азотните атоми заемат междувъзлията на плътноопакована хексагонална решетка, а CrN (21,7 %N) има кубична решетка тип NaCl. От литературата е известно, че реакционната дифузия на хрома с азот започва едва след 700 °C, като хромът за разлика от желязото няма каталитичен ефект върху амонийната дисоциация. Минималната разтворимост в твърдия разтвор на азот и по-високата плътност на електролитния слой създават бариерен ефект при дифундиранието на азота и въглерода в дълбочина, но там където покритието е напукано /основен белег на хромовите галванични покрития/ проникването на дифундирящите атоми и напълно възможно /фиг. 4b / и твърдостта на подложката нараства. В този случай типичната

структурна картина на подложката е налице, но дълбочината на дифузионната зона е много малка, само около микродефектите на покритието.

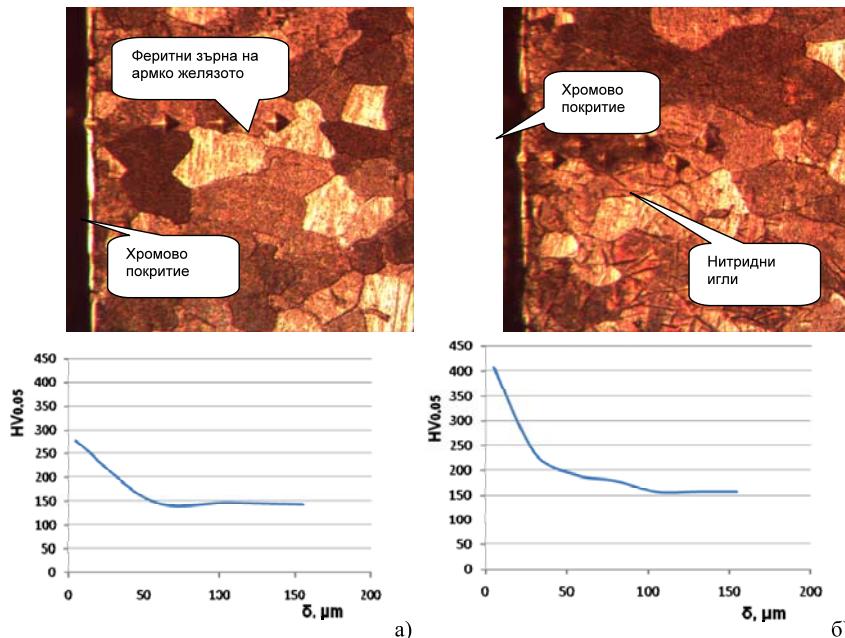


Фиг. 3. Микроструктура на оксикиарбонитрирано електролитно желязо с междинната зона за добро сцепление и подложката от 08kp както и отпечатъци от измерването на микротвърдостта, показани на по-голяма дълбочина (x200).

Измерените микротвърдости от повърхността към сърцевината на пробните тела са представени също на фиг.4. Установява се доминиращо ужчаване при зоните под пукнатини, чиято твърдост е по-ниска от тази при пробите от електролитно желязо, което след оксикиарбонитрирането все още не е рекристализирало.

Заключение

Показани са структурните различия в пробни тела от стомана 08kp и армко желязо, с нанесени върху тях галванични покрития от желязо и хром, след вакуумно оксикиарбонитриране. Проявяването с подходящи реактиви доказва, че кинетиката и фазовия състав на обогатените метали и подложката се различават съществено. Докато електролитното желязо не възпрепятства дифузионния процес, а дори се установява известен ускоряващ дифузията неочекван ефект от катализитичното действие на желязото върху амоняка, то плътното хромово покритие при избраната температура на оксикиарбонитриране е дифузионна бариера за атомите на азота и въглерода към подложката. Посредством промяна на налягането на остатъчната атмосфера в ретортата е възможно управление на азотния потенциал при насищането, а оттам структурата, свойствата и фазовия състав на обогатените зони. Това, заедно с повишаване на температурата на операцията, е предмет на следващи изследвания.



Фиг.4. Микроструктура (препоявена с Nital, $\times 250$) и характер на микротвърдостта под хромираната подложка от армко желязо с отпечатъците за микротвърдост в дълбочина: а/ на обогатена плътна зона от хром и подложката под нея; б/ зона непосредствено под пукнатини в хромовото покритие.

Най-висока твърдост се наблюдава в дифузионната зона след вакуумно оксикиарбонитриране на твърдо, износустойчиво електролитно желязо. Това уячаване се дължи на:

- пресищане с азот и въглерод на подложките и формиране на нови фази;
- все още запазената изходна структура на електролитното желязо в почти целия обем на покритието;
- множеството структурни дефекти в обогатените зони;
- частично нерелаксирал остатъчни напрежения в покритието.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самонов Г.В., Нитриды, Наукова думка, Киев 1966;
2. Данев П., Уредба и технологии за вакуумното азотиране, карбонитриране, оксикиарбонитриране, Трудове на научната сесия РУ, 2004, р. 73-77, ISSN 1311-3321;
3. Данев П. Вакуумно оксикиарбонитриране на конструкционни стомани; Трудове на научната сесия РУ, 2004 г; ISSN 1311-3321;
4. Лахтин Ю.М. – Диффузионные основы процесса азотирования – „Металловедение и термическая обработка металлов”, №7, 1995;
5. Ovako Steel – Properties of nitrided Components – A result of the Material and the Nitriding Process – Technical Report 1/1999.

**Вакуумно оксикарбонитриране
на различно структурирано електролитно желязо
възху подложка от армко желязо**

автор: Юлияна Ганчева

научен ръководител: ас. Мария Николова

Abstract: In this study the microstructural and microhardness characteristics of untreated and vacuum annealed electrolytic iron coatings together with their substrates are compared. There is a significant difference in the diffusion kinetics of the specimens because of the structural difference of the coatings. As a result the straightening effect of the substrates due to the nitrides' presence is diverted.

Key words: thermo-chemical treatment, oxy-nitrocarburizing, electrolytic iron, vacuum annealing

Въведение

Съществуват различни методи за газово карбонитриране, включително при понижено налягане. Известно е, че разреждането на амония с друг въглеродосъдържащ газ премахва в известна степен крехкостта на свързаната зона. При температура под 590°C разтворимостта на въглерода във ферита е минимална, така че той само участва във формирането на карбонитридната ϵ - $\text{Fe}_3(\text{N},\text{C})$ фаза. Морфологията на получения наасищен карбонитриден слой зависи не само от условията на получаването му и състава на газовата фаза, но и от структурните особености на използваната подложка [1].

Целта на направеното изследване е установяване на различията в структурата и твърдостта на оксикарбонитридните зони, получени в условия на понижено налягане и газова фаза, съдържаща NH_3 и CO_2 на пробни тела от металургично и галванично получено желязо.

Методика на изследването

Върху пробните тела от армко желязо ($\varnothing 20 \times 10 \text{ mm}$) са отложени покрития от електролитно желязо. Химичният състав на армко- и електролитното желязо е получен на "SPECTRON" и е показан количествено (тегловни %) в таблица 1.

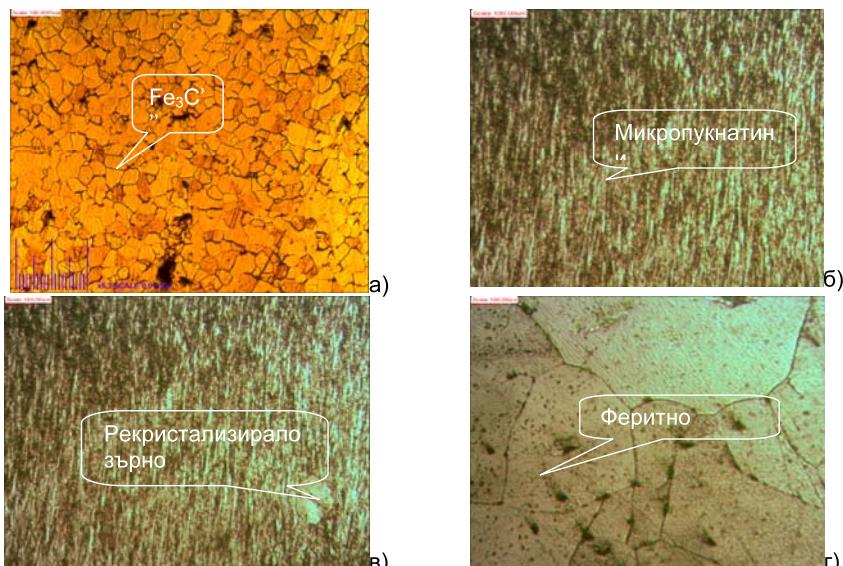
Табл.1. Химичен състав на армко и електролитно желязо (тегловни %)

Елемент	C,% P, %	Si,% S, %	Mn,% Fe, %	Cr,%	Mo,%	Ni,%	Co,%	Cu,%
Армко желязо	0,020 0,007	0,130 0,020	0,139 Остан.	0,033	0,002	0,073	0,008	0,090
Електролитно желязо	0,000 0,006	0,015 0,002	0,003 Остан.	0,004	0,002	0,028	0,015	0,040

След нанасяне на покритието две от пробите са подложени на вакуумно отгряване при температура 600 и 950 °C съответно за 1 час и налягане 200 Pa. След това се оксикарбонитрират при температура 570 °C по режим посочен в [2]. Повърхностната твърдост на пробните тела се измерва с преносим твърдомер "Krautkramer" – Германия и натоварване 1 кг. Микротвърдостта е отчетена върху проявената микроструктура на дифузионния слой посредством твърдомер ПМТ-3. Структурните характеристики на слоевете преди и след насищането се изучават с помощта на оптичен микроскоп Erytup-2 и Olympus BX-41M.

Резултати и обсъждане

На фигура 1 а, б, в и г, са представени микроструктурите съответно на подложката от Армко желязото получено чрез леене, електрохимичното желязо след напластвяване, както и след след вакуумно отгряване при 600 и 950°C. Армко желязото (фиг. 1а) притежава сравнително едрозърнеста (около 20 μm среден размер на зърната) феритна структура с отделен Fe_3C по границите и по-рядко в зърната.



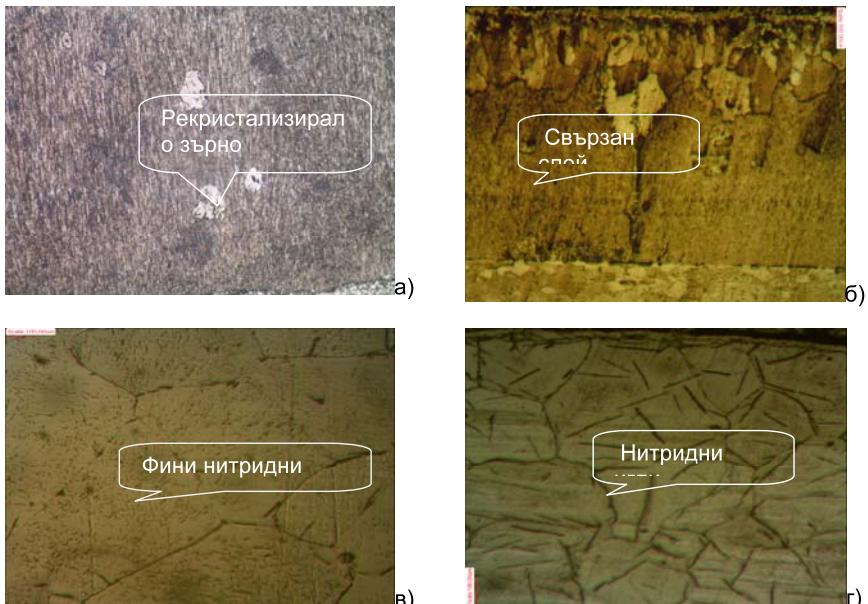
Фиг.1. Микроструктура на желязото преди насищане след проявяване с Нитал: а) Армко желязо (200x); б) напластено електролитно желязо (250x); в) отгрято при 600° електролитно желязо (250x); г) Армко желязо отгрято при 950° (250x).

Електролитното желязо (фиг. 1б) след напластвяване има ултрайдисперсна структура, съдържаща множество дефекти. Структурата представлява съвкупност от малки и по-слабо свързани помежду си кристали. Микроструктурно е видно, че желязото има стълбест строеж, при който се формират „пакети“ от стотици монослоеве в направление, перпендикулярно на повърхността на желязната подложка.

В структурата на вакуумно отгятото при 600°C (фиг. 1в) електролитно желязо се наблюдават рекристализирани феритни зърна. Те се намират най-често в близост до повърхността на електролитния слой, което може да е свързано с по-високите стойности на натрупаните микронапрежения там. В този случай рекристализацията не е протекла до край по дълбочина на покритието, за разлика от отгрятото при по-високата температура желязо (фиг. 1г), при което ултрайдисперсната структура е изцяло прекристализириала.

Особеностите на мироструктурата на оксикарбонитридните слоеве са показани на фиг. 2 а, б, в и г. При насищането на ултрайдисперсните метални сплави (фиг. 2а и 2б) трябва да се имат предвид структурните им особености, тъй като те значително се различават от ляйтите, поради факта, че разстоянието, които трябва да бъдат преодолени чрез дифузия са значително по-малки. Достигането на дифузионния фронт до зърната на подложката преустановява високата скорост на дифузия в покритието от електролитно желязо. В Армкото желязо преминаването на

насцентните атоми е както по границите, така и през α -твърдия разтвор. Формата на нитридите в подложката е предимно като груби γ' -игли, които се уедряват в дълбочина. Карбонитридният свързан слой на повърхността изглежда значително тъньк и накъсан. Ускореното движение на атомите през слоя определя по-бавното достигане на пределна концентрация на повърхността му за формиране на плътна свързана зона, която е с по-малка дебелина от тази при останалите преби. Заедно с това, облекчената дифузия през галваничното желязо със силно развита гранична повърхност, води до натрупване на N и C на границата с подложката, а понякога и до формиране на втора прилежаща свързана зона [3, 4].

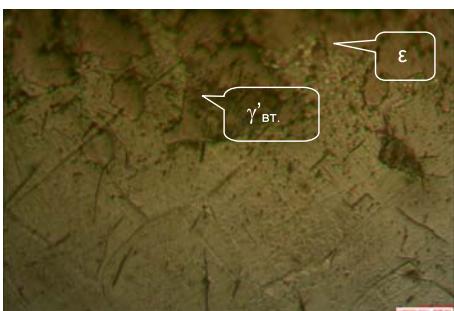


Фиг. 2. Микроструктура на оксикарбонитрираните преби, проявени с Нитал: а) напластено оксикарбонитрирано желязо (250x); б) вакуумно отгрято желязо при 600°C (250x); в) Електролитно желязо, отгрято при 950°C (1500x); г) Армко желязо, отгрято при 950°C (1500x)

При вакуумно отгрято при 600°C желязо (фиг. 2б) образуваните в рекристализираните зърна карбонитриди са с много дисперсна структура. Свързаният слой тук е с по-голяма дебелина, а количеството на нитридните игли в подложката е по-малко като последните са разположени на по-малка дълбочина. Причината за това е забавената дифузия на дифузиращите атоми през рекристализираните под формата на дендритни зърна. Въпреки това на местата, в които са се запазили микропукнатини в електролитното желязо, се е образувала свързана зона, подобна на тази при напластеното електролитно желязо.

При вакуумно отгрято при 950°C желязо в микроструктурата на електролитния слой се наблюдават феритните зърна със съществено увеличен размер (фиг. 2в), в които се съдържат множество дисперсни нитриди с различна форма, големина и разпределение. Някои автори [5] асоциират микроструктурно по-дисперсните, иглоподобни структури с присъствие на α -преципитати, с които Fe_3N -твърдия разтвор се намира в равновесие под 400°C. По-едните нитридни игли се намират по-близо до граничните области на зърната, където азотната концентрация

е по-висока като на някои места до повърхността се наблюдава дори формирана свързана зона.



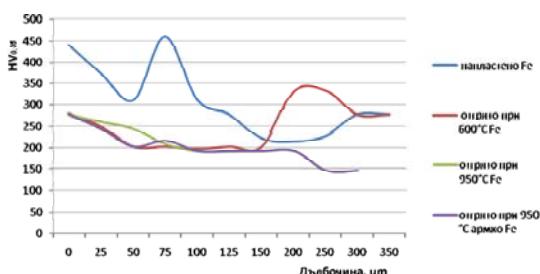
Фиг. 3. Микроструктура на армко желязо отгрято при 950°C (1500x).

плътна свързана зона установена микроструктурата на свързаната зона на сравнително бавното охлаждане след наблюдаваните дисперсни преципитати в именно с наличие на вторично отделени γ' - нитриди от пресилената ϵ -фаза.

Твърдостта на дифузионния слой след карбонитриране (табл. 2) трябва да се свързва с няколко основни фактора: пренасищането с азот на $\alpha\text{-Fe}$ матрица,

Табл.2. Твърдост $[HV]$ измерена преди и след оксикарбонитриране

	Образец	Напластено [HV ₀]	Отгрято при 600°C [HV ₁]	Отгрято при 950°C [HV ₂]
Преди насищане	Електролитно Армко желязо	400	80	75
	Армко желязо	130	125	120
След насищане	Електролитно Армко желязо	550	350	235
	Армко желязо	-	-	205



Фиг. 4 Сравнение на дълбочинния профил на микротвърдостта на оксикарбонитрираните преби.

запазва малко по-висока. При Армко желязото, поради наличието на едри Fe_4N с

При газово азотиране е установено, че освен температурата, времето на зъдържане и вида на газовата смес, влияние върху развитието на γ' -нитридните игли оказва и ориентацията на повърхностно разположените зърна [6]. Този факт кореспондира със структурата на отрятото Армко желязо (фиг. 2г). Високо температурният процес е позволил по-пълно освобождаване на $\text{Fe}_3\text{C}''$ по границите на зърната, а присъствието му там възпрепятства активната дифузия, откъдето следва и наблюдаваната разлика в морфологията на иглите. Налице е и металографски. Фиг. 3. представя същата проба. Като се има предвид карбонитриране в среда с азот, то свързаната зона могат да се асоциират

именно с наличие на вторично отделени γ' - нитриди от пресилената ϵ -фаза. Твърдостта на дифузионния слой след карбонитриране (табл. 2) трябва да се свързва с няколко основни фактора: пренасищането с азот на $\alpha\text{-Fe}$ матрица, преципитирането на нитриди, натискови остатъчни напрежения [7, 8] и преди всичко с твърдостта на материала преди химико-термичната обработка, а тя зависи основно от дисперсността на микроструктура и дефекти в нея. Очаквано, измереното повишение на твърдостта не е особено съществено, тъй като то се дължи главно на дисперсни, но меки фази или на наличие на остатъчни напрежения в структурата.

Разпределението на микротвърдостта в дълбочина на насищания слой за различните образци е показано на фиг. 4. При вакуумно отгрятите при 950°C електролитно и Армко желязо (фиг. 4. зелено, липаво) се наблюдава характерния плавно намаляващ ход на микротвърдостта, като поради дисперсността на нитридните фази в електролитното желязо, микротвърдостта при него се

ниска твърдост, минималното уякчаване е резултат от твърдо-разтворно пресищане и ниски натискови напрежения. При отгрято при 600°C електролитно желязо (*фиг. 4, червено*) микротвърдостта на разстояние до $150 \mu\text{m}$ се запазва почти постоянна на ниво около $200 \text{ HV}_{0.05}$. Тази твърдост съответства на областта с границата на рекристализиралите зърна и тези с дендритна форма. Следващото повишение на микротвърдостта съответства на навлизането в ултрайдисперсната нерекристализирана зона, която е и силно напрегната и обогатена с азот.

По-висока твърдост от последната е измерена само при оксикарбонитрираното напластено желязо (*фиг. 4., син*), при което количеството на проникнатите N и C атоми е най-голямо, поради най-развитата гранична повърхност. Наблюдаваният минимум в близост до повърхността може да се асоциира именно с наличието на първично рекристализирали зърна и свързаното с тях намаляване на остатъчните напрежения в структурата. Разминаването на максимумите на само напластеното и отгрято при 600°C желязо по място е свързано с различната дебелина на нанесените електролитни покрития на пробите и моментното положение на границата на рекристализация в тях.

Заключение

От настоящата работа могат да бъдат направени следните констатации:

1. Структурното състояние на подложката до голяма степен предопределя скоростта, дълбочината на насищане при оксикарбонитрирането при понижено налягане, което оказва влияние и върху вида и дебелината на получената дифузионна и свързана зони.

2. Поради дисперсността и дефектността на покритието от електролитно желязо азотът и въглеродът достига до границата с подложката, където се натрупват и дифузират с по-бавна скорост.

3. Показани са съществените различия в структурните особености на свързания и дифузионен слоеве, получени при електролитното и Армко желязо, вакуумно отгряти при 950°C .

4. Наблюдаваното минимално уякчаване след оксикарбонитриране на желязото се дължи на твърдо-разтворно пресищане и натискови напрежения в Армко желязото, докато в отгрято електролитно такова - и на количеството и дисперсността на нитридните фази. При оксикарбонитрираното напластеното и нискотемпературно отгрято желязо, по-високата твърдост, освен с по-горното, е свързана с предварително формираната структура, генерираните дефекти и остатъчните напрежения в нея.

ЛИТЕРАТУРА

1. Winter Karl-Michael, *Techn. Paper*, Process-Electronic GmbH, United Process Controls, Heiningen, Germany;
2. Данев П., *Трудове на научната сесия РУ*, 2004, р. 73-77, ISSN 1311-3321;
3. Nikolova M., Danev Pl., Dermendjiev Iv., *Metal 2010*, 19 Int. Metal. Conference: Roznov pod Radhostem, Check Republic; May 2010, p 148;
4. Somers M., Proefschrift; *Chem. Tech. and Mat. Sci.* of the Delft University of Technology, 1989;
5. Maliska AM, de Oliveira AM., Klein AN, Muzart J.L.R., *Surf Coat. Technol.*, 141 (2001) 128-134;
6. Inokuti Y., Nishida N., Oashi N, *Metall. Trans.* 6A (1975) 773-784;
7. Bell T., Loh NI, J. *Heat Treatment* 2, (1982) 232;
8. Priestner R., Priestner DM, *Surf. Eng.* 10 (1994) 65.

Сравняване на оптичните свойства на графенови и ITO слоеве

автор: Марина Иванова

научен ръководител: доц. Първолетка Дочева

Abstract: A comparison of optical properties between Grafene and ITO layers. The optical properties of graphene layers (a chemically-reduced graphene dispersion is synthesized and graphene films are prepared from it [1]) are compared with those of experimentally obtained ITO layers in Materials department at Rousse University. The resulting graphene films possessed an excellent electrical conductivity with a high transparency. A sheet resistance lower than ~2 k Ω /sq and a transparency over 80% were achieved at a typical wavelength of 550 nm.

Key words: Thin films, Magnetron Sputtering, Graphene, ITO layers

ВЪВЕДЕНИЕ

Прозрачните проводници (TC) са основни компоненти в много фотоелектронни устройства, като например течно-кристални дисплеи (LCD), органични слънчеви клетки, органични светодиоди (OLED), смарт стъкла и т.н. Индиево-калаения окис (ITO) е основния материал при производството на прозрачни проводници заради високата електропроводимост и оптична прозрачност. Въпреки това, има редица недостатъци свързани с използването му: (1) цената на индия се повишава непрекъснато, което прави ITO слоевете все по скъпи; (2) свойствата на ITO слоевете изостават спрямо изискванията на новите приложения като например гъвкави LCD, органични слънчеви клетки, поради това, че те са крехки (3) ITO по своята същност е неподходящ при подлагане на висока температури, което прави трудно моделирането на свойствата му. Направени са изследвания върху възможността за прилагането на въглеродни нанотърбички (CNTs) като материал за TC. Графенът е нов материал, който привлича вниманието от скоро. Благодарение на необикновените си физически и механични свойства, като висока концентрация на токоносителите и подвижност, висока топлопроводимост, и най-високата механична якост измерена до сега, той притежава редица обещаващи приложения. Графенът може да замени CNTs като по-евтин, защото за производството му се използват евтини люспи графит. Методът химическа оксидация е един от най-обещаващия такъв за производство на графенови листи.

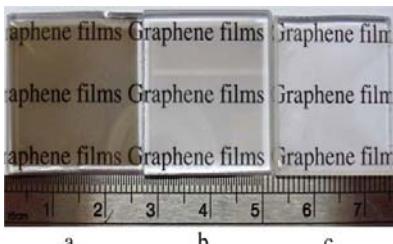
1. ПОЛУЧАВАНЕ НА ПРОЗРАЧНИ ПРОВОДЯЩИ СЛОЕВЕ

1.1. Получаване на слоеве от Графен [1] (използвани са литературни източници)

За сравнение на оптичните свойства (прозрачност) на ITO слоеве с тези на графенови такива, е използвана като основен източник статията "Fabrication of highly conducting and transparent graphene films" [1]. В тази работа подложките за графеновите слоеве са изгответа от квадратни кварцови плочки с дебелина 2 mm и страна 25 mm. Те са предварително измити с ацетон и в ултразвукова баня за премахване на органичните замърсявания. Чистите подложки се съхраняват във вакуумна пещ при температура 80 °C, преди да бъдат използвани. Графеновите филми са получени чрез вакуумна филтрация на графенов колоид. Дебелината на слоя е внимателно контролирана чрез промяна на обема на колоида.

За да се отстрани остатъчния кислород за подобряване на електрическата проводимост графеновите слоеве са термично обработени по следния начин. Тръбна пещ (Thermcraft, EUROTHERM), с високовакуумно оборудване е използвана за отгряване на филмите при 400 °C. За по нататъшна графитизация, слоевете са нагрявани до 1100 °C в продължение на 30 минути. За да се избегне изгарянето на

графеновия филм при такава висока температура, пещта е вакуумирана и след това продухвана с помощта на аргонов поток три пъти. Пеща се охлажда до стайна температура за получаване на окончателните графенови слоеве (фиг. 1).



Фиг.1. Слоеве от Графен с различни дебелини:
(a) 86 nm (b) 22 nm (c) 14 nm

1.2. Получаване на нестехиометричен индиевокален окис (ITO слоеве) в среда от $\text{Ar}+\text{O}_2+\text{H}_2$ [2]

Всички покрития са получени от метална сплавна мишена In+Sn чрез правотоково реактивно магнетронно разпращане във вакуумна лаборатория на катедра МТМ. Най-голяма ел. проводимост имат слоеве, разпращени от сплавна мишена 90 тегл. % In-10 тегл.%Sn [2]. Разпращането се извършва в реактивна атмосфера $\text{Ar}+\text{O}_2+\text{H}_2$ при следните параметри на разряда: $U = 600\text{V}$, $I = 160\text{ mA}$, $P_{\text{tot}} = 3 \cdot 10^{-3}\text{ Torr}$, $P_{\text{O}_2} = 3 \cdot 10^{-4}\text{ Torr}$, $P_{\text{H}_2} = 1 \cdot 10^{-4}\text{ Torr}$, като са взети предвид следните особености:

1. Тази сплав се топи при температура по-ниска от 473 K, което изисква много малки мощност на разряда (под 100W).

2. Тъй като мишената се разпращава в реактивна среда, предварително експериментално се определя областта от парциални налягания на кислорода, в която се получават нестехиометричните ITO слоеве.

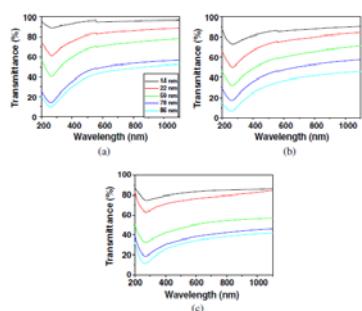
В нашия случай освен O_2 , разпращащата атмосфера съдържа и H_2 . Данните за особеностите на характеристиките на разряда, условията за получаване на слоевете, оптичните им качества за този случай са съвсем осъждни. При постояннотков разряд в среда от $\text{Ar}+\text{H}_2$ видовете иони, бомбардиращи мишената са H^+ , Ar^+ и ArH^+ . Коефициентите на разпращане за H^+ и Ar^+ се различават с около порядък. Като се има предвид това, става ясно, че H_2 само взаимодействва с повърхността на разпращаната мишена и с разпрашените атоми. Неговото участие в процеса на разпращане може да се пренебрегне.

2. СРАВНЯВАНЕ НА ОПТИЧНИТЕ СВОЙСТВА НА ПОЛУЧЕНИТЕ ITO СЛОЕВЕ С ТЕЗИ НА ГРАФЕНА

2.1. Прозрачност на графенови слоеве

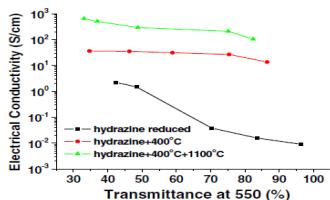
Фигури. 2 и 3 представят UV-Vis и IR спектри, съответно за графенови филми с различни дебелини третирани по три различни начина, показващи промените в пропускането за дължини на вълните между 200 - 3000 nm. Има две становища по отношение на прозрачността на графеновите филми. Прозрачността на слоевете намалява с увеличаване на дебелината им при съответното третиране. Увеличението на дебелината води до увеличаване на обратното отражение и поглъщането на светлината, което води до намаляване на прозрачността. Другият феномен е, че топлинната обработка има вредно въздействие върху прозрачността на графеновия филм. Всички криви както в UV-VIS (фиг. 2) и IR (фиг. 3) показват тенденция за намаляване на пропускането при топлинна

обработка, което предполага, че прозрачността намалява след отгряване при 400°C и продължава да спада при следващото графитизиране до 1100°C . Деградацията на прозрачността на графеновите филми по време на термична обработка, се приписва на подобряване на нивото на редукция. Специално внимание трябва да се отдели на IR спекtri на графеновите филми с дебелина 14 nm, получен след топлинна обработка при 1100°C (фиг. 3 (в)). Пропускането е рекордно високо над 85% в цялата област от 1100 до 3000 nm. Това е забележителен резултат, тъй като неотдавнашно изследване на проводими графенови електроди за сенсибилизирани с боя слънчеви клетки показват само 70% пропускане за 10 nm графенов слой при същия вълнов обхват. ITO и дотиран с флуор калаен окис (FTO) широко използвани като прозрачни електроди в оптоелектронни устройства, показват много по-ниско пропускане особено при по-дългите дължини на вълните. Това показва, че графеновите слоеве, са от особена важност за приложенията в слънчевите клетки и други оптоелектронни устройства. Освен това е направен анализ за установяване на някакво съответствие между електрическата проводимост и пропускането, измерени при дължина на вълната от 550 nm, в зависимост от дебелината на графеновия филм, както е показано на фиг. 4. Избрана е дължина на вълната 550 nm, тъй като чувствителността на човешкото око там е най-голяма и е типична при характеризиране прозрачността на TC.

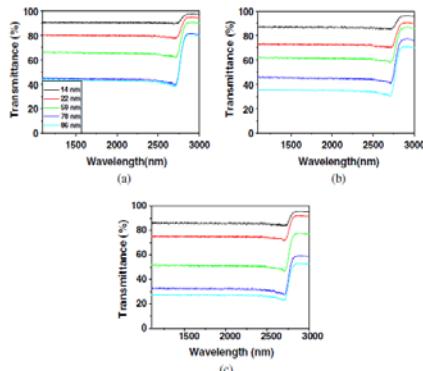


Фиг. 2. UV VIS спекtri на графенови филми, получени на различни етапи на третирането:
(a) редуциране с хидразин, (б) хидразин + 400°C и (в) хидразин + $400^{\circ}\text{C} + 1100^{\circ}\text{C}$.

Ясно се вижда, че електрическата проводимост постепенно намалява, докато пропускането се увеличава. Това наблюдение е от практическо значение за TC тъй като то позволява чрез контролиране на дебелината на слоя да се балансира между тези две свойства. Както се вижда от това изследване, прозрачни проводящи слоеве с пропускане над 80 % и електропроводимост над 200 S / cm (или листовосъпротивление $1\text{-}2 \text{ k}\Omega / \text{кв.м}$) са получени. Тези свойства са достатъчни за много важни приложения, включително за телевизионни камери с докосващи панели [5]. В това изследване е постигнато най-ниско листово съпротивление $181,2 \Omega / \text{кв.м}$ (или електропроводимост = 649 S / cm) и около 35% пропускане при дължина на вълната от 550 nm.



Фиг. 4. Електропроводимоста като функция на пропускането при дължина на вълната от 550 нм на различни етапи от третирането.



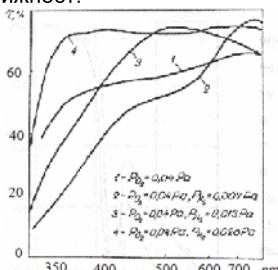
Фиг. 3. IR спектри на графенови филми, получени на различни етапи на третиране: (а) редуциране с хидразин, (б) хидразин + 400 С и (в) хидразин + 400 С + 1100 С.

2.2. Прозрачност на ITO слоеве

Най-подходящата област за получаване на ITO слоеве е областта с най-бързо променящи се характеристики на разряда. Тази област в случая е от $x=0,03$ до $x=0,13$ ($x=P_{O_2}/P_{tot}$). На фиг.5. е показан спектъра на пропускане на ITO слой, получен при $P_{O_2}=0,04$ Pa-крива 1. Вижда се, че същият не е от най-прозрачните. Кривите 2, 3 и 4 демонстрират влиянието на прибавения в разпрашващата атмосфера водород върху пропускането на ITO слоевете във видимата част на спектъра. Най-добре пропуска четвъртият слой ($P_{H_2}=0,026$ Pa). Това парциално налягане на водорода подобрява както общото пропускане в цялата видима област, така и премества абсорбционната ръб към синята част на спектъра.

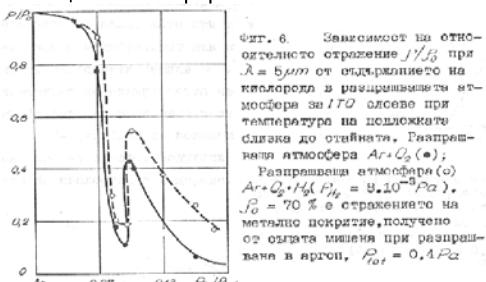
Като качествена мярка на получените ITO слоеве при различни парциални налягания на кислорода се използва отражението при $\lambda=5\mu m$.

Отражението намалява в областта от $x=0,03$ до $x=0,08$, нараства и отново налява при $x>0,13$. Голямото отражение се обуславя от голямата електрическа проводимост на слоевете, т.е. от концентрацията на свободните заряди N и тяхната подвижност.



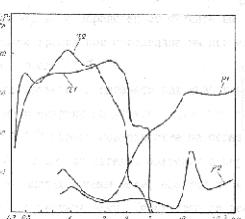
Фиг. 5. Влияние на P_{H_2} върху спектрите на пропускане на ITO слоеве при $P_{O_2}=0,04$ Pa

На фиг.6. е показана зависимостта на относителното отражение r/r_0 от отношението x между парциалното налягане на кислорода и общото налягане. Таза зависимост е показана за два случая-без водород(крива—) и с водород(крива- -) в разпращашщата атмосфера.



Специално за ITO слоеве N зависи от стехиометрията и примесната концентрация. При ниски налягания на кислорода калаят е включен като Sn^{2+} на мястото на In^{3+} . При по-висока P_{O_2} , калаят е включен като Sn^{4+} на мястото на In^{3+} . Това обуславя по-голямата концентрация на свободните заряди. Малкото отражение при $x > 0,13$ се дължи на разтворения кислород в слоя. ITO слоевете могат да включват повече кислород от необходимия за стехиометрията им. Излишният кислород не е химически свързан с раштаката на окиса, а е разтворен във вид на междузвълови атоми. Тези излишни кислородни атоми залавят зарядите от Sn^{4+} , т.е. действат като електронни уловки и намаляват свободните заряди в слоя, както и неговото отражение. Водородът се свързва с излишния кислород и под формата на вода го отстранява от слоя, като при това двойно зарадените кислородни ваканции дифундират във вътрешността на слоя като увеличават свободните заряди N .

На фиг.7. са показани спектрите на пропускане и отражение на слоевете, получени при различни парциални налягания на кислорода и водорода.



Оже-анализът показва почти еднакъв състав на слоевете. Оптичните характеристики, обаче, са твърде различни. По-ниското отражение при по-високото $P_{\text{O}_2}=0,04$ Pa(крива ρ_2) е обяснимо, ако се приеме, че присъствието на фази като SnO и Sn_3O_4 могат да бъдат причини за по-високо съпротивление, т.е. по-ниското отражение. Тези фази на калая се получават при по-високо P_{O_2} .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прозрачните проводящи графенови слоеве получени чрез вакуумна филтрация на графенов колоид показват забележителните свойства: прозрачността им е и над 80%, а електропроводимоста е над 200 S / см (или листовото съпротивление 1-2 килоома / кв.м) при дължина на вълната от 550 nm. Тези свойства са много важни за много приложения, включително чувствителни при докосване панели за телевизионни камери. Те биха

могли да замествят досега използваните ITO слоеве, които освен че са скъпи, но са и много капризни за получаване.

ЛИТЕРАТУРА

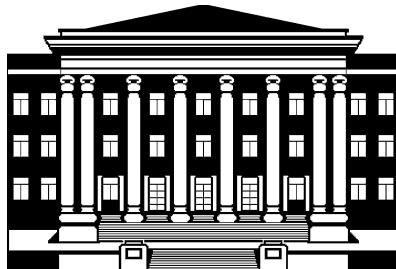
1. Shu Jun Wang, Yan Geng, Qingbin Zheng, Jang-Kyo Kim, Fabrication of highly conducting and transparent graphene films, CARBON 48 (2010) 1815 –1823
2. Дочева П., Дисертация, 1989

За контакти:

Марина Валентинова Иванова, специалност ТММ, Русенски университет “Ангел Кънчев”, e-mail:marina_87@abv.bg

Доц. д-р Първолетка Иванова Дочева, Катедра “МТМ”, Русенски университет “Ангел Кънчев”, тел.: 082-888 306, e-mail: docheva@uni-ruse.bg

**РУСЕНСКИ УНИВЕРСИТЕТ
“АНГЕЛ КЪНЧЕВ”**



**СТУДЕНТСКА НАУЧНА
СЕСИЯ
СНС'12**

ПОКАНА

**Русе, ул. "Студентска" 8
Русенски университет
“Ангел Кънчев”**

Факултет „Машинно-технологичен“

**СБОРНИК ДОКЛАДИ
на
СТУДЕНТСКА НАУЧНА СЕСИЯ – СНС'11**

Под общата редакция на
доц. д-р Стоян Стоянов

Отговорен редактор:
доц. д-р Ангел Смрикаров

Народност българска
Първо издание

Формат: А5
Коли: 6.25
Тираж: 20 бр.

ISSN 1311-3321

**ИЗДАТЕЛСКИ ЦЕНТЪР
на Русенския университет “Ангел Кънчев”**