



## ДИАМАНТНО ЗАГЛАЖДАНЕ НА НАСТАВОВИ ОТВОРИ – КРАЙНО-ЕЛЕМЕНТНА СИМУЛАЦИЯ

### DIAMOND BURNISHING OF RAIL-END-BOLT-HOLES – FINITE ELEMENT SIMULATION

Галя В. Дунчева\*

Технически университет Габрово

Йордан Т. Максимов

Технически университет Габрово

Велизар Т. Кузманов

Технически университет Габрово

Ангел П. Анчев

Технически университет Габрово

Статията е постъпила на 5 септември 2013 г.; приета за отпечатване на 3 октомври 2013 г.

#### Abstract

*This article presents the outcomes from finite element (FE) simulation of the diamond burnishing of rail-end-bolt-holes. A reliable 3D FE model of the studied process has been developed with a view to fundamental understanding of the residual stress formation. The introducing of beneficial residual circumferential normal stresses around the treated hole closes the existing cracks and impedes the formation of new ones and thus enhances the fatigue life of the rail road.*

**Keywords:** diamond burnishing; rail-end-bolt-holes; enhancement of fatigue life; residual stresses; finite element simulation.

#### 1. ВЪВЕДЕНИЕ

Във всеки конструкционен и машинен елемент скрепителните отвори са критично място от гледна точка на якост и уморна дълготрайност, тъй като са естествени концентратори на деформации и напрежения. Работните напрежения са най-големи по абсолютна стойност в точките от повърхността на отвора. При наличие на статичен товар пукнатиноустойчивостта на съответния конструкционен елемент се лимитира от този концентратор. Ако външният товар е цикличен, от повърхността на отвора започва зараждането и развитието на пукнатини от умора. И в двата случая експлоатационния срок на конструкционния елемент зависи от състоянието на материала в и около концентратора, т. е. качеството на повърхностния слой на отвора в аспект на остатъчни напрежения и дълбочина на разпределението им, грапавост и микротвърдост. Комплексът от тези качества е известен в литературата като "surface integrity". Повишаването на уморната дълготрайност на отвора изисква съответна технология за обработване, целяща постигане на необходимия комплекс от свойства (surface integrity), а именно: минимална грапавост; максимална микротвърдост; остатъчни окръжни нормални напрежения на натиск; максимална дълбочина на натисковата зона. Когато отворът е в конструкционен елемент от цветна сплав, една от операциите за получаване на минимална грапавост – шлифоването – отпада като възможно. Същевременно всяка операция за довършващо обработване чрез рязане внася опънови остатъчни напрежения. Ето защо исканата технология за постигане на желаните свойства на повърхността на отвора трябва да бъде основана на пластична деформация. Когато изискването за мобилност на приложението на техноло-

гията не е поставено (така например в аероиндустрията условието за мобилност е задължително!), и обработването се извършва в цех, оборудван с конвенционални металорежещи машини, тогава е целесъобразно да се приложи студена пластична деформация. Когато контактът между деформиращия елемент и отвора е непрекъснат в напречно сечение (перпендикулярно на оста на отвора), пластичната деформация се извършва на значително по-голяма дълбочина, респ. генерираните полезни остатъчни напрежения на натиск са разпределени на значителна дълбочина. Този полезен ефект се постига от метода „сферично дорноване“ [1-6], когато се реализира върху конвенционални машини, и по показател „дълбочина на натисковата зона“ е съизмерим с методите за студено разширение на отвори [7-17]. Когато контактът между деформиращия елемент и отвора е прекъснат в напречно сечение, пластичното деформиране се осъществява само в повърхностните слоеве и генерираната натискова зона от остатъчни напрежения е с дълбочина под 1mm. В този случай се говори за „повърхностно пластично деформиране“ (ППД). Методите, реализиращи този подход, могат да се класифицират по различни признаци. Според вида на триенето между деформиращия елемент и повърнината на отвора се различават два вида методи: обтъркаване с ролки или сфери, при което триенето е при търкаляне; триене при плъзгане. Според ефекта, който се цели да се постигне, световният лидер мулти-националната компания Ecorol различава два метода за ППД: roller burnishing и deep rolling. Първият метод е познатото и у нас обтъркаване с ролки или сфери. Прави впечатление, че няма диференциация по признак „вид на деформиращия елемент“ – сфера или ролка; основното е, че контактът е при търка-

\* Тел.: 066827312; e-mail: duncheva@tugab.bg

ляне (впрочем за всички инструменти на Escorol тангенциалният контакт с повърхнината на заготовката е триене при търкаляне). Основната цел на този метод е да произведе „burnishing“, т. е. заглаждане на повърхностния слой, при което грапавостта значително се редуцира; например някои инструменти, обикновено снабдени с ролки, реализират огледални повърхности (mirror burnishing). Останалите атрибути на повърхностния слой (повишена микротвърдост, натискови остатъчни напрежения), присъщи на обработката с ППД, също са налице, но по-скоро са съпътстващи и не са значими. Основната цел на втория метод (deep rolling) е да произведе едновременно три ефекта: burnishing, т. е. заглаждане на повърхностния слой (който ефект по презумпция е по-слабо изразен в сравнение с първия метод); повишена микротвърдост; натискови остатъчни напрежения с по-голяма интензивност и на значителна дълбочина. Първият метод се използва, когато изискванията са насочени към минимална грапавост и точност на съответната повърхнина. Вторият метод цели преди всичко повишаване на уморната дълготрайност. Преобладаващата част от изследванията на различни изследователи са насочени към изучаване на ефектите от прилагане на първия метод [18-31]. Повишената уморна дълготрайност на съответните елементи, постигната чрез обработване с втория метод, е изследвана значително по-малко, и то предимно на външни повърхнини [32-36].

От методите, при които триенето между деформиращия елемент и повърхнината на отвора е при плъзгане, най-голямо внимание заслужава „диамантно заглаждане“ [37-43] (в руската литература – „алмазные выглаживание“; в англоезичната – diamond burnishing). Методът се прилага в САЩ, Япония, Русия и др. и е почти неизползван у нас. Както показва името, деформиращия елемент е диамант, най-често изкуствен (в страната с най-много залежи на диамант в света – Русия се използват и естествени диаманти). Чрез този метод се постига аналогичен ефект на този, постигнат с deep rolling, а по отношение на дълбочината на натисковата зона с полезни остатъчни напрежения – дори го превъзхожда. Проучванията показват, че методът е намерил по-голямо приложение за обработване на външни цилиндрични повърхнини. Обяснението вероятно е в схемата на обработката, която предполага използване на универсални инструменти, произведени от фирмите - монополисти, каквито са Elliott, Cogsdill Tool Products Inc., JD Tools. За обработване на отвори е необходимо да се конструират специални изпълнения на устройства (инструменти), в които деформиращия диамантен елемент да е установен еластично. Според Korzynski [44] за отвори с малка дължина могат да се използват и твърдо закрепени деформиращи диамантни елементи. Като цяло, методът е по-евтин [44] в сравнение с roller burnishing и deep rolling, а предимство на деформиращия елемент (диамант) е много малкият коефициент на триене с металната заготовка – според Korzynski [44] този коефициент е в интервала 0.02-0.08. Деформиращият елемент (изкуствен диамант) е лесно достъпен дори у нас и може да се намери на цена приблизително 20 лв. Трайността му при обработка на високо-яки стомани според Яценко [38] достига до 100000 m обработана дължина. Това означава, че с един деформиращ елемент с подаване 0.1 мм/об могат да се обработят над 5500 отвори с диаметър 33 mm и дължина 16.5 mm, каквито размери имат например наставовите отвори в краищата на ж.п. релси.

Проблемът с уморната дълготрайност на наставови (болтови) отвори в краищата на ж.п. релси, които служат за свързване на две съседни релси от състава на наставов ж.п. път с болтови съединения, е известен от повече от три десетилетия [45, 46]. Тъй като тези отвори са естествен концентратор на напрежения, преминаването на подвижния железопътен състав през наставовия възел резултира в циклично натоварване. Последното е причина за поява на пукнатини от умора, които се зараждат и стартират развитието си от повърхнината на наставов отвор. След достигане на критичната дължина на тези пукнатини следва разрушение на края на съответната релса. По данни на Британските железници (British Railway (BR)) за периода 1980-1990 г. 25% от аварияте и катастрофите са причинени от разрушения краищата на ж.п. релси [45]. За същия период в САЩ процентът на аварияте и катастрофите по тази причина е 30 [45]. В България, по данни на Националната компания железопътна инфраструктура, счупванията на краищата на ж.п. релси (фиг. 1) имат сериозен задел в общия брой дефекти на наставовите пътища.



Фиг. 1. Развитие на пукнатини през наставовите отвори на релсов край

Ефективна превенция срещу този дефект е въвеждането на полезни остатъчни окръжни нормални напрежения на натиск около наставовите отвори. Един от подходите за това е студено разширение на тези отвори, например чрез системата RailTec (RtCx), разработена от американската компания от Сиатъл Fatigue Technology Inc. Приложението ѝ е възприето като стандартна инженерна практика в жп пътищата не само в САЩ. Така например Британските железници (BR) са внедрили RailTec за всички жп линии от клас А в Обединеното кралство, а администрацията на Юнион Пасифик (UP) е нормирала приложението ѝ за всички релсови пътища в западните щати както за операции от текущото поддържане, така и като важен елемент от технологията при изграждане на нови жп пътища. Резултатите от изпитанията са показали, че системата е високо ефективна. Срокът на експлоатация на релсите преди появата на пукнатини от умора се е увеличил от три до десет пъти [46]. Първите тестове са извършени по поръчка на Транспортния департамент на САЩ. По обширни лабораторни и експлоатационни изпитвания и икономически анализи са проведени от Техническият център на BR. Като резултат системата RailTec е приета за внедряване на хиляди мили железопътната мрежа на BR. Икономическата ефективност се дължи на плановите икономии от намален надзор на пътя, на намаляване на разходите

за текущо поддържане и смяна на релсите, на по-малкия риск от аварии и катастрофи. Използването на тази система изисква първоначални инвестиции за закупуване на техническото оборудване на системата, които инвестиции за българските условия могат да се окажат немалки.

Вторият подход за въвеждане на полезни остатъчни напрежения на натиск, които да затворят съществуващи пукнатини от първи тип по повърхността на наставовите отвори и да попречат да се развият нови такива, е пластично деформиране на повърхностния слой на отвора на възможно най-голяма дълбочина чрез методите за ППД. Този подход е подходящ за случая, при който пробиването на наставов отвор се извършва върху металорежеща машина, например РВ, както е случая във ФАЕ – София. Използвайки направеното базиране, след свредловане (и ако е необходимо следващо зенкерование) отворът се подлага на deep rolling или диамантно заглаждане. Първата възможност изисква подходящо устройство на Esocol. Втората възможност е по-евтина (тъй като изисква конструиране на несложно устройство в сравнение с това за deep rolling) и същевременно по-ефективна, защото въвежда полезните остатъчни напрежения на натиск на относително по-голяма дълбочина.

Иновативни конструкции (фиг. 2) на устройства за обработване посредством диамантно заглаждане на наставови отвори в краищата на ж.п. релси върху фрезови металорежещи машини са разработени от авторите [47]. С изработените в метал устройства са проведени експериментални изследвания [48] на получаваната грапавост на обработени отвори в заготовки от стомана 41Cr4 (1.7035) БДС EN 100083-1:2006 и са намерени рационални стойности на технологичните параметри на процеса.



а.



б.

Фиг. 2. Иновативни конструкции на устройства за диамантно заглаждане: а. с едностранно действие; б. с двустранно действие

За да се оцени ефектът върху уморната дълготрайност от прилагане на диамантното заглаждане, е необходимо да се познава в качествен и количествен аспект разпределението на остатъчните напрежения около от-

ворите. Тъй като уморното разрушение в краищата на ж.п. релсите се причинява от възникване и развитие на пукнатини от първи тип около болтовите (наставовите) отвори, от решаващо значение са остатъчните окръжни нормални напрежения. Известно е [38], че генерираната зона с остатъчни окръжни напрежения на натиск след диамантно заглаждане достига до 1 mm. Един от най-използваните експериментални методи за измерване на остатъчни напрежения е x-ray diffraction [49]. Този метод многократно е използван в случаите на студено разширени отвори [50-53]. За измерване на остатъчни напрежения около наставови отвори методът е неприложим по две главни причини:

- диаметърът на рентгеновия лъч е съизмерим с дълбочината на натисквата зона, поради което остатъчните напрежения не могат да бъдат измерени по достъпните челни повърхнини;
- невъзможността за насочване на рентгенов лъч тангенциално на повърхнината на отвора.

От друга страна, експерименталният метод deflection etching technique (основан върху метода на разрязания пръстен [54] или върху метода на Zacks [55]), който е приложен за случаите на малка дълбочина на натисквата зона [3] до няколко десети, е твърде приблизителен. Освен това изисква изрязване на пръстен около наставовия отвор.

Предвид посочените причини е целесъобразно използването на метода на крайните елементи (МКЕ).

В настоящото изследване прилагането на МКЕ се основава върху подхода, разработен от Максимов и Дунчева в [56].

Основна цел на изследването е да се намери разпределението на полезните остатъчни окръжни нормални напрежения около наставови отвори след обработването им чрез диамантно заглаждане.

## 2. СЪСТОЯНИЕ НА ПРОБЛЕМА С КРАЙНО-ЕЛЕМЕНТНОТО СИМУЛИРАНЕ НА ПРОЦЕСА ДИАМАНТНО ЗАГЛАЖДАНЕ

Един от първите КЕ модели на процеса ППД е разработен от Roettger [57], използвайки “DEFORM-2D®”. В този 2D КЕ модел, тип равнинно деформиран, недеформируема сфера упражнява натиск върху грапава повърхност на обработваната заготовка, докато силата на притискане достигне съответна предписана големина. След това сферата се повдига и се премества встрани, на разстояние, равно на подаването за оборот. Тъй като в този модел се контролира силата на притискане, дълбочината на проникване на инструмента не може да се оцени коректно, поради дефинирания линеен контакт.

Вземайки този 2D модел за база, Yen et al. [58] го доразвиват, използвайки същия софтуер “DEFORM-2D®”. Те разработват и пространствен (3D) КЕ модел. В тези модели е използван контрол по преместване, като е зададена времева крива на нормалното преместване на инструмента към заготовката. Процесът е симулиран, както в [57], чрез поредица от нормални въздействия към обработваната повърхнина. Времето за въздействие за един цикъл е изчислено като отношение на диаметъра на контакта между сферата и обработваната повърхнина (измерен в края на цикъла) и скорост, равна на скоростта на периферна точка от въртяща се заготовка, подложена на ППД. По този начин, работейки в реално време, се взема под внимание и скоростта на деформация чрез подходящ конститутивен модел на матери-

ала на заготовката. Използван е модел с изотропно уявяване, в който еквивалентното напрежение зависи от еквивалентната пластична деформация и от производната ѝ по времето. Моделирана е част от заготовката, включвайки част от подлежащата на обработване повърхнина, с размери  $2 \times 4 \text{ mm}$ . Дълбочината на проникване е  $0.27 \text{ mm}$ . Приет е теоретичен модел на грапавините с дълбочина (разстояние „връх и падина“)  $0.011 \text{ mm}$  и разстояние между два съседни върха, равно на  $0.18 \text{ mm}$ , колкото е подаването за оборот на предходната обработка. На базата на сравнение на резултатите за остатъчните напрежения, получени от 2D и 3D KE модели, с експериментални такива Yen et al. [58] установяват, че 2D KE модел е с по-висока степен на адекватност. Тези KE модели са усъвършенствани в следваща публикация на авторите [59].

KE модел на процеса ППД на стомана AISI1042 е разработен от Bouzid and Sai [60] за определяне на преместванията на върховете на грапавините. Установена е добра корелация между крайно-елементните и експерименталните резултати за грапавостта. Използвайки софтуера MARC, Deng et al. [61] разработват 3D крайно-елементен модел на процеса ППД, при който се отчита термо-механичната природа на процеса. Прието е, че еквивалентното напрежение в точка от заготовката зависи от еквивалентната деформация, от производната ѝ по времето и от температурата. Материалните свойства на заготовката са температурно зависими. Инструментът (сфера) е приет идеално твърд. Дефинирано е Кулоново триене между инструмента и заготовката. Авторите изследват влиянието на параметрите на процеса ППД върху остатъчните напрежения. Те установяват, че влиянието на скоростта на деформация е пренебрежимо малко. Следователно конститутивният модел на материала на заготовката е целесъобразно да не съдържа производната по времето на еквивалентната пластична деформация.

Kita and Pan [62] разработват KE модел на процеса ППД на външни цилиндрични повърхнини с ролки. Те използват ABAQUS/Standard за определяне на остатъчните напрежения. Доказват адекватността на KE модел чрез сравнение на KE резултати за остатъчните напрежения с такива, по експериментален път.

Максимов и Дунчева [56] разработват KE модел на процеса заглаждане със сферично движение (spherical motion burnishing), при който контактът между инструмента и заготовката е триене при плъзгане, и разработват подход за дефиниране на конститутивния модел на материала в KE-я модел.

На основата на анализа на състоянието на проблема с KE моделиране на процеса ППД може да се направят следните изводи:

- Много малка част от публикациите, посветени на ППД, се отнасят до KE симулации на този процес, и то преобладава случаят, реализиран с контакт триене при търкаляне, докато при диамантното заглаждане контактът е триене при плъзгане.

- KE симулации спестяват много време и средства, но разбира се, не могат да имат претенции да елиминират експеримента. Изследването на процеса диамантно заглаждане значително ще се интензифицира, ако се разработи надежден KE модел.

### 3. КРАЙНО-ЕЛЕМЕНТНА СИМУЛАЦИЯ

#### 3.1. Параметри на процеса диамантно заглаждане

Основните параметри на процеса диамантно заглаждане са [44]: сила на притискане на деформиращия елемент към заготовката; подаване за оборот; относителна линейна скорост между контактуващата двойка деформиращ елемент – заготовка; брой на преходите. В крайно-елементната симулация се използват първите два параметъра. Третият параметър е без значение, защото конститутивния модел на материала не зависи от скоростта на деформация. Броят на преходите е един. В KE модел се използва контрол по преместване, поради което силата на притискане се изразява чрез дълбочината на проникване на диамантния накрайник в обработваната повърхнина.

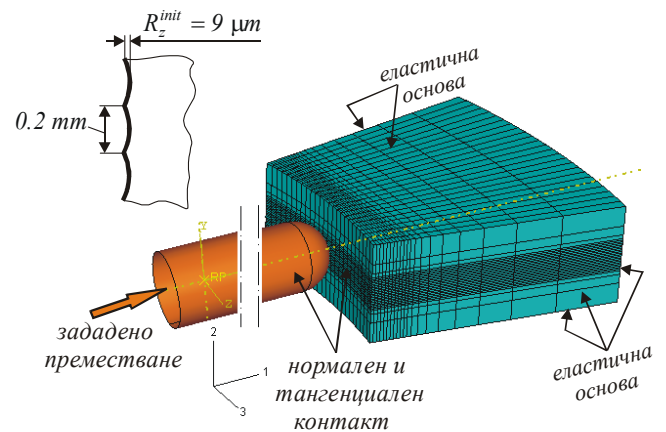
#### 3.2. Зависимост на силата на притискане от дълбочината на проникване

За определяне на зависимостта  $F_b = F_b(d_p)$ , където  $F_b$  е сила на притискане на деформиращия елемент към повърхността на отвора, а  $d_p$  е дълбочина на проникване на деформиращия елемент, е разработен 3D KE модел.

##### 3.2.1. Крайно-елементен модел

###### а. Обща характеристика.

Показан е на фиг. 3. Деформиращият диамантен елемент е моделиран като идеално твърдо тяло. От заготовката, започвайки от повърхностния слой на отвора, е изрязано тяло с приблизителни размери  $3 \times 7 \times 8 \text{ mm}$ . Началните микрограпавини на повърхностния слой на отвора имат стъпка  $0.2 \text{ mm}$  и височина  $R_z = 9 \mu\text{m}$ . Тялото е изрязано посредством цилиндрична повърхнина и две двойки успоредни равнини. Моделираната част от заготовката е дискретизирана с 13000 хексаедрални KE тип C3D8R с общо 14742 възела.

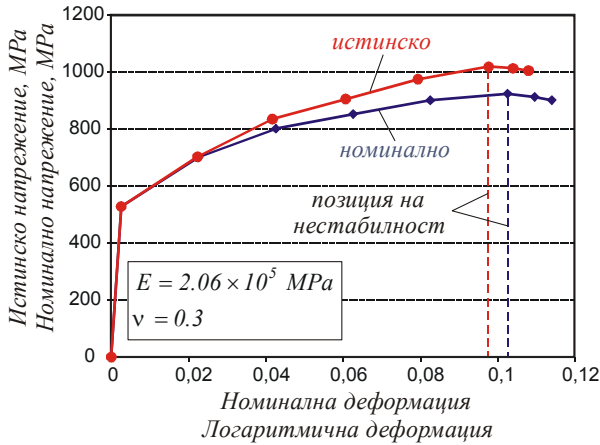


Фиг. 3. 3D крайно-елементен модел

###### б. Конститутивен модел на материала

Тъй като целта на настоящото изследване е да се докаже ефективността на диамантното заглаждане за въвеждане на полезни остатъчни напрежения на натиск около наставови отвори, конститутивния модел на материала е дефиниран на базата на едномерен тест на чист опън. По този начин търсеният ефект ще се определи в качествен аспект. За точно количествено определяне на остатъчните напрежения е необходимо конститутивния модел да се получи по методиката, разработена в [56].

Материалът е релсова стомана R260. Диаграмата „номинално напрежение – номинална деформация” е получена в лабораторията „Изпитание на металите” към Технически университет Габрово (фиг. 4). За целта от стълбото на отработила релса е изрязана част, от която са изработени пробни тела (епруветки). В ABAQUS v. 6.5-1 се използва тензор на Cauchy или „истинско напрежение”, което кореспондира със сила за текуща площ на напречното сечение на пробното тяло (епруветка), а мярката на деформацията е „логаритмична деформация”.



Фиг. 4. Диаграма “напрежение – деформация”

От диаграмата „номинално напрежение – номинална деформация” ( $\sigma_{nom} - \varepsilon_{nom}$ ), получена от едномерен опънов тест, необходимите данни „истинско напрежение – логаритмична деформация” ( $\sigma_{true} - \varepsilon_{ln}$ ) се получават по известните формули [63]:

$$\sigma_{true} = \sigma_{nom}(1 + \varepsilon_{nom}); \varepsilon_{ln} = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{ln}^p = \varepsilon_{ln} - \frac{\sigma_{true}}{E} \quad (2)$$

Дефинирано е нелинейно кинематично уякчаване:

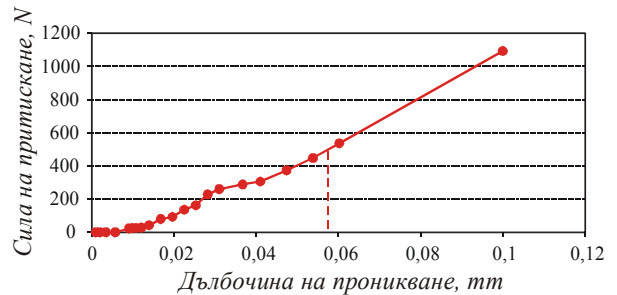
$$\dot{\alpha}_{ij} = \frac{C}{\sigma^0} \sigma_{ij}^a \dot{\bar{\varepsilon}}_{Pl} - \gamma \alpha_{ij} \dot{\bar{\varepsilon}}_{Pl} \quad (3)$$

където  $\sigma^0$  е еквивалентно напрежение, дефиниращо размера на повърхнината на провлачване, чиято начална големина е  $\sigma|_0$  - еквивалентно напрежение, дефиниращо размера на повърхнината на провлачване за нулева пластична деформация ( $\sigma^0$  е определено от едномерен тест на опън, като е прието, че  $\sigma^0$  е валидно за всички възможни напрегнати състояния и пътища на натоварване; по този начин  $\sigma|_0$  е границата на провлачване ( $\sigma_S$ );  $\bar{\varepsilon}^{Pl}$  е еквивалентната пластична деформация;  $\alpha_{ij}$  е тензорът на микронапреженията;  $C$  е начален кинематичен модул на уякчаване;  $\sigma_{ij}^a = \sigma_{ij} - \alpha_{ij}$ ,  $\sigma_{ij}$  е тензор на напреженията;  $\gamma$  е коефициент, който определя скоростта на намаляване на  $C$  с увеличаване на еквивалентната пластична деформация  $\bar{\varepsilon}^{Pl}$ . Материалните параметри  $C$  и  $\gamma$  са определени на базата на диаграмата „номинално напрежение – номинална деформация”, получена от едномерен тест на чист опън. Данните за „истинско напрежение – логаритмична деформация” са получени от зависимости (1) и (2) и са въведени в ABAQUS като масив ( $\sigma_{true} - \varepsilon_{ln}$ ).

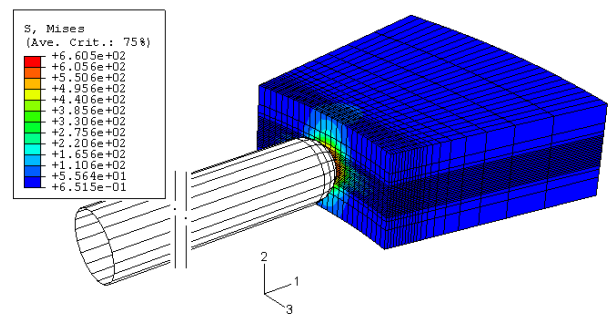
в. *Взаимодействие*  
Между деформиращия елемент и отвора е дефиниран нормален контакт с възможност за отделяне и тангенциален контакт с коефициент на триене при плъзгане 0.05. Върху свободните стени на анализирания част е дефиниран контакт „еластична основа” с коефициент на еластичната основа  $2 \times 10^5 \text{ N/mm}^3$ . По този начин се отчита взаимодействието на моделираната изрязана част с останалата част от релсата.

г. *Гранични условия*

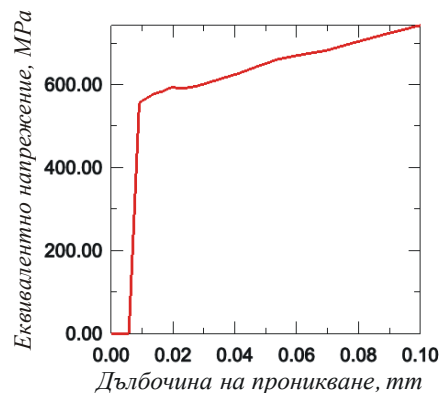
Зададено е радиално преместване на деформиращия елемент чрез т. нар. Reference point (RP), а резултатът е търсен като реакция в същата точка. Тази реакция съответства на силата  $F_b$ , а преместването – на дълбочината на проникване  $d_p$ . Останалите степени на свобода на RP на деформиращия елемент са елиминирани.



Фиг. 5. Графики на зависимостта  $F_b = F_b(d_p)$



Фиг. 6. Разпределение на еквивалентните напрежения, следствие от прилагане на сила от 400 N



Фиг. 7. Зависимост на еквивалентното напрежение от дълбочината на проникване

3.2.2. Крайно-елементни резултати

Показани са на фиг. 5. Необходимата сила на притискане  $F_b = 400 \text{ N}$  се постига при дълбочина на проник-

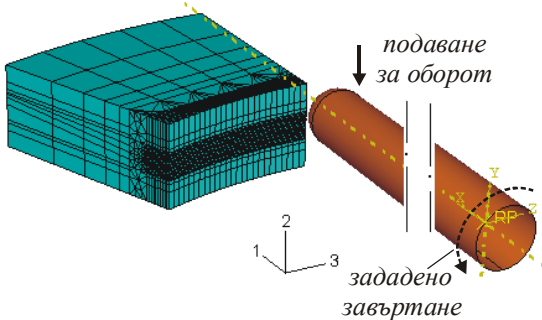
ване  $d_p = 0.05mm$ . На фиг. 6 е показано разпределение на еквивалентните напрежения в заготовката, следствие от прилагане на сила на притискане от  $400N$ . Фиг. 7 показва зависимостта между еквивалентното напрежение в центъра на контакта между деформиращия елемент и заготовката във функция от дълбочината на проникване  $d_p$ . Като се вземе предвид фиг. 4, минималната дълбочина на проникване, при която се осъществява пластифициране на повърхностния слой на заготовката е  $d_p = 0.012mm$ , на която, съгласно фиг. 5, съответства сила на притискане  $F_b = 90 N$ .

### 3.3. Крайно-елементна симулация на процеса диамантно заглаждане на наставови отвори

#### 3.3.1. Крайно-елементен модел

##### а. Обща характеристика.

Показан е на фиг. 8. Изграден е от същите материални обекти, както този от фиг. 3. Разликата е в дискретизацията на заготовката с цел намаляване на общия размер на изследвания проблем. Причината е в необходимостта от значително повече оперативна памет, поради сложните взаимодействия между деформиращия елемент и заготовката. С цел коректно прилагане на получената информация от раздел 3.2.2, слой с дебелина от 1мм около отвора е дискретизиран със същия вид и брой крайни елементи, както модела от фиг. 3. КЕ модел съдържа 6750 хексаедрални КЕ тип С3D8R и 1977 тетраедрални КЕ тип С3D4. Общият брой на възлите е 8470.



Фиг. 8. Крайно-елементен модел на процеса диамантно заглаждане на наставови отвори

##### б. Конститутивен модел на материала

Същият, като описания в раздел 3.2.1

##### в. Взаимодействия

Същите, като описаните в раздел 3.2.1

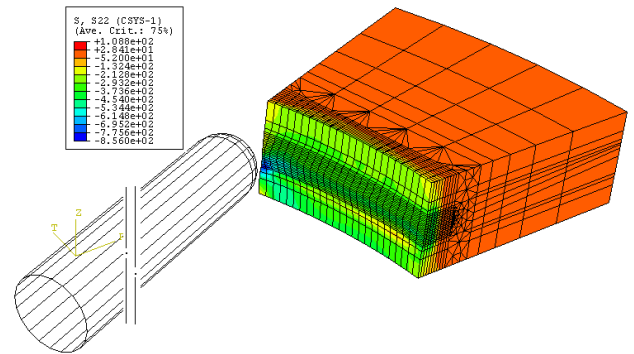
##### г. Гранични условия

На заготовката са наложени същите гранични условия, както в раздел 3.2.1. Инструментът прави общо 10 хода, като за всеки следващ ход се премества срещу оста у на разстояние, равно на приетото подаване за оборот от  $0.1 mm$ . Работният ход на инструмента е дефиниран чрез завъртане около ос у (ос на отвора). За да се облекчи анализът и да се опростят граничните условия, всеки ход на инструмента се осъществява в отделен анализ (което съответства на отделен модел в ABAQUS), като резултатите в премествания, напрежения и деформации, получени в n-тия анализ дефинират началните условия за (n+1)-я анализ.

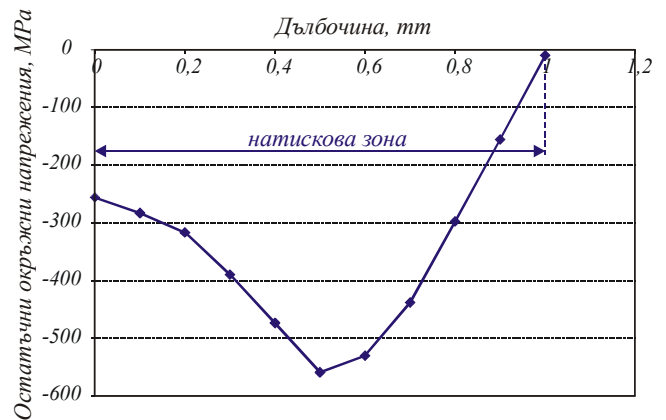
#### 3.3.2. Крайно-елементни резултати за остатъчни напрежения

Остатъчните окръжни нормални напрежения в заготовката, дефинирани в цилиндрична координатна сис-

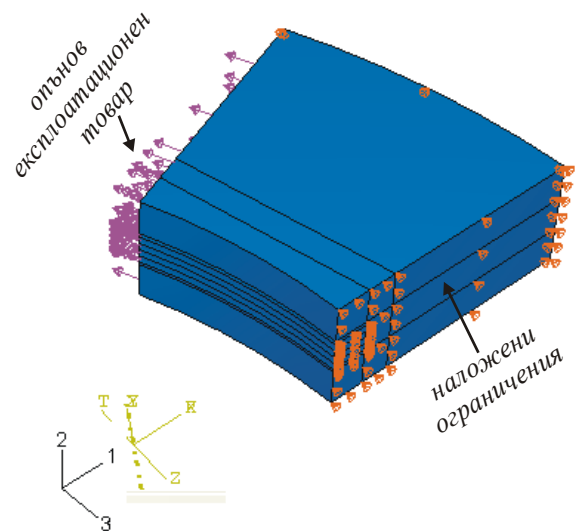
тема, след 10-тия ход са показани на фиг. 9. Получената концентрация в долната лява част се дължи на приетите гранични условия и се изключва от анализа. Разпределението в дълбочина на тези остатъчни напрежения по правата, която е пресечница на двете равнини на симетрия на заготовката, е показано на фиг. 10. Очевидно, дълбочината на натисквата зона достига до 1mm и е с достатъчна интензивност, за да затвори повърхностни микро-пукнатини от първи тип.



Фиг. 9. Разпределение на остатъчните окръжни нормални напрежения в заготовката



Фиг. 10. Разпределение на остатъчните окръжни нормални напрежения по пресечницата на двете равнини на симетрия



Фиг. 11. Модифицирани гранични условия

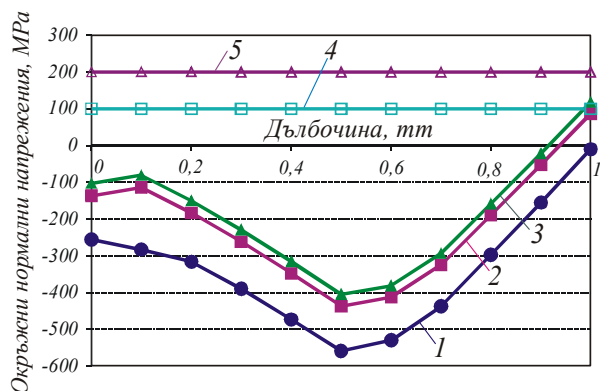
## 4. АНАЛИЗ НА ОСТАТЪЧНИТЕ НАПРЕЖЕНИЯ

За да се илюстрира ефекта от въведените остатъчни окръжни нормални напрежения на натиск след диамантно заглаждане, в заготовката за въведени работни ок-

ръжни нормални напрежения. За целта КЕ модел от фиг. 8 е модифициран по следния начин: инструментът е елиминиран, а по двете срещуположни стени (виж фиг. 11) контактите „еластична основа” са премахнати. В цилиндрична координатна система по едната повърхнина (фиг. 11) са назначени нулеви премествания в окръжно направление, а по другата повърхнина е дефинирано напрежение на опън.

За начално напрегнато и деформирано състояние на заготовката е дефинирано състоянието след 10-тия работен ход на инструмента в предходния анализ, т. е. въведените полезни остатъчни напрежения на натиск с кореспондиращите премествания и деформации.

На фиг. 12 е показано преразпределението на въведените чрез диамантно заглаждане остатъчни напрежения, следствие от експлоатационни опънови окръжни напрежения. В [16] е показано, че тези напрежения са следствие от предварителното налягане на наставовия възел и са причина за зараждане и развитие на пукнатини от умора. Както се вижда от фиг. 12, дори при опънови експлоатационни напрежения от 200 МПа, окръжните резултантни напрежения остават на натиск и препятстват (забавят) развитието на уморни пукнатини от първи тип.



Фиг. 12. Преразпределение на остатъчните окръжни напрежения вследствие прилагане на експлоатационен товар на опън: 1 - остатъчни (след диамантно заглаждане); 2 - резултантни (след прилагане на опън от 100 МПа); 3 - резултантни (след прилагане на опън от 200 МПа); 4 - само опън от 100 МПа; 5 - само опън от 200 МПа

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработени са КЕ модели за симулиране на процеса диамантно заглаждане на наставови отвори в релси от стомана R260 и за изследване на формирането на полезни остатъчни окръжни нормални напрежения на натиск около тези отвори, както и преразпределението им под действие на експлоатационни опънови напрежения. Установено е, че дълбочината на натисковата зона достига 1 mm при достатъчна интензивност на остатъчните напрежения.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Maximov JT. Spherical Mandrelling Method Implementation on Conventional Machine Tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 42(12) (2002) 1315-1325.  
 [2] Maximov JT. Optimization Method for Metal-forming Processes. *Energy* 27(7) (2002) 675-701.  
 [3] Maximov JT, Anchev AP. Modelling of residual stress field in spherical mandrelling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43 (12) (2003) 1241-1251

[4] Maximov J. T., Kalchev G. M. Modelling of spherical mandrelling manufacturing resistance. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 44 (1) (2004) 95-100  
 [5] Maximov J. T. Finite element analysis of the spherical mandrelling process of cylindrical holes. *Finite Elements in Analysis and Design*. 40 (9-10) (2004) 1217-1232  
 [6] Maximov JT, Duncheva GV. A new 3D finite element model of the spherical Mandrelling process. *Finite Elements in Analysis and Design* 44 (6-7) (2008) 372-382.  
 [7] Yongshou L., Xiaojun S., Jun L., Zhufeng Y., Finite element method and experimental investigation on the residual stress fields and fatigue performance of cold expansion hole, *Materials and Design* 31 (3) (2010) 1208-1215  
 [8] Gopalakrishna H.D., Narasimha Murthy H.N., Krishna M., Vinod M.S., Suresh A.V., Cold expansion of holes and resulting fatigue life enhancement and residual stresses in Al 2024 T3 alloy – An experimental study, *Engineering Failure Analysis* 17 (2) (2010) 361-368  
 [9] Chakherlou T.N., Aghdam A.B., Akbari A., Saeeedi K., Analysis of cold expanded fastener holes subjected to short time creep: Finite element modelling and fatigue tests, *Materials and Design* 31 (6) (2010) 2858-2866.  
 [10] Rana M.S., Makabe C., Fujiwara G., The effect of hole shape on the extent of fatigue life improvement by cold expansions, *Engineering Failure Analysis* 16 (7) (2009) 2081-2090.  
 [11] Giglio M., Lodi M., Optimization of a cold-working process for increasing fatigue life, *International Journal of Fatigue*, 31 (11) (2009) 1978-1995  
 [12] Ayatollahi M.R., Arian Nik M., Edge distance effects on residual stress distribution around a cold expanded hole in Al 2024 alloy, *Computational Materials Science* 45 (4) (2009) 1134-1141  
 [13] Mahendra Babu N.C., Jagadish T., Ramachandra K., Sridhara S.N., A simplified 3-D finite element simulation of cold expansion of a circular hole to capture through thickness variation of residual stresses, *Engineering Failure Analysis* 15 (4) 339-348 (2008)  
 [14] Nigrelli V., Pasta S., Finite-element simulation of residual stress induced by split-sleeve cold-expansion process of holes, *Journal of Materials Processing Tech.* 205 (1) (2008) 290-296  
 [15] Maximov J. T., Duncheva G. V., Amudjev I. M. A novel method and tool which enhance the Fatigue life of structural components with fastener holes. *Engineering Failure Analysis* 31 (2013) 132-143.  
 [16] Duncheva G. V., Maximov J. T. A new approach to enhancement of fatigue life of rail-end-bolt holes. *Engineering Failure Analysis* 29 (2013) 167-179.  
 [17] Maximov J. T., Duncheva G. V. Apparatus and tool for cold expansion of fastener holes. Application for US patent, 2011  
 [18] El-Axir, M. H., O.M. Othman, A.M. Abodiena. Improvements in out-of-roundness and microhardness of inner surfaces by internal ball burnishing process. *J. Mater. Process. Technol.* 196(1-3) (2008) 120-128  
 [19] El-Axir, M. H., O.M. Othman, A.M. Abodiena. Study on the inner surface finishing of aluminum alloy 2014 by ball burnishing process. *J. Mater. Process. Technol.* 202 (1-3) (2008) 435-442  
 [20] Basak H., Goktas H. H. Burnishing process on al-alloy and optimization of surface roughness and surface hardness by fuzzy logic. *Materials and Design* 30 (4) (2009) 1275-1281.  
 [21] El-Taweel T. A., El-Axir M. H. Analysis and optimization of the ball burnishing process through the Taguchi technique. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 41 (2009) 301-310.  
 [22] El-Tayeb N. S. M., K. O. Low, P. V. Brevern. On the surface and tribological characteristics of burnished cylindrical Al-6061, *Tribology International* 42 (2) (2009) 320-326.  
 [23] El-Tayeb, N. S. M., Low, K. O., Brevern, P. V. Influence of roller burnishing contact width and burnishing orientation on surface quality and tribological behaviour of Aluminium 6061. *J. Mater. Process. Technol.* 186 (1-3) (2007) 272-278.  
 [24] Hua W., Man Y., Liu B. Contact force studies of a burnishing slider. *Tribology International* 41 (1) (2008) 60-66.

- [25] Korzynski, M. A model of smoothing slide ball-burnishing and an analysis of the parameter interaction. *J. Mater. Process. Technol.* 209 (1) (2009) 625-633.
- [26] Korzynski, M. Relief making on bearing sleeve surface by eccentric burnishing. *J. Mater. Process. Technol.* 209 (1) (2009) 131-138.
- [27] Shiou F. J., Cheng C. H. Ultra-precision surface finish of NAK80 mould tool steel using sequential ball burnishing and ball polishing processes. *Journal of Materials Processing Technology* 201 (1-3) (2008) 554-559.
- [28] Shiou F. J., Hsu C. C. Surface finishing of hardened and tempered stainless tool steel using sequential ball grinding, ball burnishing and ball polishing processes on a machining centre. *Journal of Materials Processing Technology* 205 (1-3) (2008) 249-258.
- [29] Shiou, F. J., Ciou, H. S. Ultra-precision surface finish of the hardened stainless mold steel using vibration-assisted ball polishing process. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 48 (7) (2008) 721-732.
- [30] Thamizhmanii S., Omar B. B., Saparudin S., Hasan S. Surface roughness investigation and hardness by burnishing on titanium alloy. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 28(2) (2008) (139-142).
- [31] Yeldose, B. C., Ramamoorthy, B. An investigation into the high performance of TiN-coated rollers in burnishing process. *J. Mater. Process. Technol.* 207 (1-3) (2008) 350-355.
- [32] Schuha A., Zeller C., Holzwarth U., Kachler W., Wilcke G., Zeiler G., Eigenmann B., Bigoney J. Deep rolling of titanium rods for application in modular total hip arthroplasty. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials* 81 (2) (2007) 330-335.
- [33] Altenberg I., Nalla R. K., Sano Y., Wagner L., Ritchie R. O. On the effect of deep rolling and laser-peening on the stress-controlled low- and high-cycle fatigue behaviour of Ti-6Al-4V at elevated temperatures up to 550°C. *International Journal of Fatigue* 44 (2012) 292-302.
- [34] Nalla R. K., Altenberg I., Noster U., Lin G. Y., Scholtes B., Ritchie R. O. On the influence of mechanical surface treatments – deep rolling and laser shock peening – on the fatigue behaviour of Ti-6Al-4V at ambient and elevated temperatures. *Materials Science and Engineering A*: 355 (2003) 216-230.
- [35] Bozdana, A. T., Gindy, N. N. Z., Li, H. 2005. Deep cold rolling with ultrasonic vibrations – a new mechanical surface enhancement technique. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 45 (6), 713-718.
- [36] Meyer D., Briuksmeier E., Hoffmann F. Surface hardening by cryogenic deep rolling. *Procedia Engineering* 19 (2011) 258-263.
- [37] Aliev K. T., Aslanov T. I. The influence of diamond burnishing on the fatigue strength and wear resistance of the shafts of petroleum chains. *Chemical and Petroleum Engineering* 15(6) (1979) 459-461
- [38] Яценко В. К., Г. З. Зайцев, В. Ф. Притченко, Л. И. Ивченко. Повышение несущей способности деталей машин алмазным выглаживанием. М., Машиностроение, 1985
- [39] Rozenberg O. A., Shulzhenko A. A., Mamalis A. G., Gargin V. G., Sokhan S. V. manufacture of tips for diamond burnishing and dressing probes for abrasive wheels with a diamond composition thermal material. *Journal of Materials Science* 38 (2003) 789-794.
- [40] Luo H., Liu J., Wang L., Zhong Q. Study of the burnishing process with cylindrical polycrystalline diamond tool. *Journal of Materials Processing Technology* 180 (2006) 9-16
- [41] Boguslaev V. A., Yatsenko V. K., Yakovlev V. G., stepanova L. P., Pukhalskaya G. V. The effect of diamond burnishing on structure and properties of detonation-gas coatings on gas-turbine engine parts. *Metal Science and Heat Treatment* 50(1-2) (2008) 44-48.
- [42] Korzynski M., Pacana A., Cwanek J. Fatigue strength of chromium coated elements and possibility of its improvement with slide diamond burnishing. *Surface and Coatings Technology* 203 (2009) 1670-1676.
- [43] Korzynski M., Lubas J., Swirad S., Dudek K. Surface layer characteristics due to slide diamond burnishing with a cylindrical-ended tool. *Journal of Materials Processing Technology* 211 (2011) 84-94.
- [44] Korzynski M., Maximov J. T. Nonconventional Finishing Technologies, Rzeszow University of Technology, Poland, 2013 (monograph)
- [45] Reid L. Overcoming Rail-End Bolt Hole Cracking by Cold Expansion Pre-Stressing. Report; Fatigue Technology Inc., Seattle, Washington, USA
- [46] Reid L. Beneficial residual stresses at bolt holes by cold expansion. in: J. J. Kalker et al. (Eds), *rail Quality and Maintenance for Modern Railway Operation*, Kluwer Academic Publishers, Printed in Netherlands, 1993, pp. 337-347.
- [47] Максимов Й. Т., Дунчева Г. В., Амуджев И. М. Заявка за патент за изобретение с вх. номер 111527/05.07.2013. Устройство за довършваща обработка на ротационни повърхнини.
- [48] Амуджев И. М., Анчев А. П., Ненчев П. Н., Кузманов В. Т. Диамантно заглаждане на отвори в заготовки от стомана 41 Cr4 (1.7035) БДС EN 100083-1:2006. V Национална конференция по машиностроене и машинознание, 08.09 – 10.09, Варна, 2013
- [49] Ganey N., Kraus I. Engineering applications of X-ray stress analysis. In: 49th Annual conference on applications of X-ray analysis (Denver X-ray conference), 31.07–04.08 2000, Denver Colorado, USA, vol. 44, pp. 174–86.
- [50] Maximov J. T., Duncheva G. V., Ganey N., Amudjev I. M. Modeling of Residual Stress Distribution around Fastener Holes in Thin Plates after Symmetric Cold Expansion. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* (DOI: 10.1007/s40430-013-0090-2).
- [51] Maximov J. T., Duncheva G. V., Ganey N. Enhancement of fatigue life of net section in fitted bolt connections. *Journal of Constructional Steel Research* 74 (2012) 37-48.
- [52] Maximov JT, Duncheva GV, Ganey N, Bakalova TN. The benefit from adequate finite element simulation of the cold hole expansion process. *Engineering Failure Analysis* 16(1) (2009) 503-511
- [53] Maximov JT, Duncheva GV, Kuzmanov TV. B Modelling of hardening behaviour of cold expanded holes in medium carbon steel. *Journal of Constructional Steel Research* 64(3) (2008) 261-267
- [54] Давиденков Н. Н. Измерение остаточных напряжений в дисках. Заводская лаборатория №3, 1957.
- [55] Биргер И. А. Остаточные напряжения. ГНТИ „Машиностроительной литературы”, М., 1963.
- [56] Maximov J. T., Duncheva G. V. Finite Element Analysis and optimization of spherical motion burnishing of low-alloy steel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 226(1) (2012) 161-176.
- [57] Roettger K. Walzen Hartgedrehter Oberflaechen. PhD Dissertation, WZL, RWTH Aachen, 2002
- [58] Yen, Y. C., Sartkulvanich, P., Altan, T. Finite Element Modeling of Roller Burnishing Process. *CIRP Annals – Manuf. Technol.* 54 (1) (2005) 237-240.
- [59] Sartkulvanich P., Altan T., Jasso F., Rodriguez C. Finite element modeling of hard roller burnishing: an analysis on the effects of process parameters upon surface finish and residual stresses. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 129 (4) (2007) 705-716.
- [60] Bouzid W., Sai K. Finite element modelling of burnishing of AISI 1042 steel. *International Journal of Advanced Manufacture Technology* 25 (5-6) (2005) 460-465.
- [61] Deng W. J., Hia W., Zhou Z. Y., Chen W. P., Li Y. Y. Finite element analysis of effects of ball burnishing parameters on residual stresses. *Materials Science Forum* 471-472 (2004) 658-662.
- [62] Kita Y., Pan S. Finite element analysis of roller burnishing process. In: MIC 2002, Proceedings of Modelling, Identification and Control, Innsbruck, Austria, 2002
- [63] Hibbit, Karlsson and Sirensen Inc. ABAQUS/CAE theory manual, version 6.5, ABAQUS Inc. Rising Sun Mills, 166 Valley Street Providence, RI 02909-2499; 2004.