

Резюмета на научните трудове
на доц. д-р инж. Ангел Петров Анчев
представени за участие в конкурс за „професор“
в област на висше образование - 5.Технически науки,
професионално направление - 5.6. Материали и Материалознание,
специалност - Материалознание и технология на машиностроителните материали

1. *Подобряване на характеристиките на Surface Integrity, износоустойчивостта и уморното поведение на конструкционни елементи от еднофазен и двуфазен алуминиев бронз*

Научни Трудове: 1.В.1, 1.В.2., 1.В.3, 1.В.4, 4.Г.11, 4.Г.12, 4.Г.13, 4.Г.14

Статиите представят резултатите от повърхностно пластично деформиране посредством диамантно заглаждане на образци от еднофазен и двуфазен алуминиев бронз.

Посредством многоцелева оптимизация са получени оптималните стойности на технологичните параметри на процеса. Извършен е натурен експеримент за определяне на коефициента на триене при плъзгане между върха на диаманта и обработваната повърхност за широк интервал на изменение на скоростта на плъзгане.

Представени са резултати от проведени тестове на износоустойчивост в условията на сухо и гранично триене с оглед употребата на алуминиев бронз във втулки за плъзгащи лагери.

Доказана е ефективността, на избрания статичен метод за повърхностно пластично деформиране, чрез получените подходящи текстура на повърхността, повишена микротвърдост, полезни остатъчни напрежения на натиск и издробенна микроструктура на повърхността и на значителна дълбочина. Подобряването на всички гореизброени параметри води до положителен ефект върху поведението на умора на образци от алуминиев бронз, например ограничената граница на умора се повишава с 16,7%, а уморната дълготрайност повече от 77 пъти.

2. *Подход, основан на нов конститутивен модел на материала на повърхностните и подповърхностни слоеве и условия за достигане на стабилизирани цикъл, за оценка на уморното поведение на образци от нисколегирани конструкционна стомана 37Cr4 обработени посредством диамантно заглаждане*

Научни Трудове: 1.В.8, 1.В.9;

Статиите представят комбиниран експериментален и КЕ подход за дефиниране на конститутивен модел на материала на повърхностните и подповърхностни слоеве на нисколегирани конструкционна стомана 37Cr4, провеждането на свързани термо-

механични КЕ анализи и при какви условия се достига стабилизиран цикъл на натоварване. Адекватността на предложения модел и подход за достигане на стабилизиран цикъл се доказват посредством тестове на умора чрез въртеливо огъване, експериментално измерване на остатъчните напрежения и получена микроструктура на повърхностния слой. Освен това посредством уморни тестове е изследвано влиянието на броя на преходите и коефициента на циклично натоварване. Установено е, че най-голяма граница на умора се достига при образци обработени с шест прехода, докато коефициента на циклично натоварване влияе незначително, при нарастване на броя на преходите границата на умора намалява поради ефекта на релаксация на остатъчните напрежения (доказано посредством тест на умора с последващ X-ray analysis за измерване на остатъчните напрежения). Поради термомеханичната природа на процеса, е установено че генерираната температура намалява благоприятния ефект от въведените остатъчни напрежения, като по този начин намалява дълготрайността на умора на съответния конструкционен елемент.

3. Изследване, базирано на влиянието на началната микроструктура, фазов състав, технологични параметри, върху получаваната микротвърдост и якост на умора на образци от аустенитна хром-никелова стомана AISI 304L.

Научни Трудове: 1.В.7, 4.Г.15;

Представени са резултати от експериментално изследване на образци от аустенитна хром никелова стомана AISI 304L подложени на диамантно заглаждане. Резултатите показват получената микротвърдост и якост на умора при вариране на технологичните параметри – радиус на върха на инструмента, силата на притискане и подаването. Посредством обработката с диамантно заглаждане на образци от AISI 304L се постигат положителни ефекти – повишена твърдост и якост на умора, които в противен случай биха се получили от прилагането на скъпи и замърсяващи технологии. Също така, прилагането на повърхностно пластично деформиране с диамантно заглаждане води до появата на повърхността на обработваните образци на индуциран α' – мартензит, който влияе положително върху уморното поведение. Посредством количествен фазов анализ и последващи уморни тестове е установено, че образци обработени с оптимални стойности на технологичните параметри и пет прехода води до 38% повишаване на границата на умора, в сравнение с образци обработени само чрез струговане, а за същият случай микротвърдостта нараства от 366 HV0,05 до 609 HV0,05, което е ръст от 66,4%.

4. Сравнително изследване между процесите диамантно заглаждане, повърхностна пластична деформация с тороидална ролка и deer rolling върху образци от нисколегирана въглеродна стомана върху параметрите на Surface Integrity (микротвърдост, микроструктура, остатъчни напрежения, грапавост) и уморно поведение

Научни Трудове: 1.В.6, 4.Г.7;

В статиите са представени резултати от сравнително експериментално и КЕ изследване включващо три статични процеса реализиращи burnishing методи: диамантно заглаждане (ДЗ), заглаждане с ролка (RB) и deep rolling (DR). Обработваният материал е стомана 41Cr4. Използваните методи за изследване са напълно свързан термомеханичен КЕ анализ и натурни експерименти. Изследването е проведено при едни и същи стойности на управляващите фактори, като основната разлика между сравняваните процеси е типът на контакт между деформация елемент и повърхността, която се обработва - триене при плъзгане за ДЗ и контакт триене при търкаляне за RB и DR. ДЗ бе реализирано с поликристален диамант със сферичен край, докато RB и DR са реализирани с помощта на тороидална ролка със същата големина на радиуса на тороидалната повърхност, както тази на радиуса на деформация диамант. Обектите на сравнение са сами по себе си процеси и се отчитаха промени в състоянията на термодинамичните системи, както и в получените surface integrities (SIs) на обработваните образци и тяхното уморно поведение. Установено бе, че три четвърти от приложената работа при ДЗ се превръща в топлина в зоната на контакт „деформиращ елемент – детайл“, което води до разякчаване на повърхностните слоеве. Сравнението на енергийните баланси при изследваните процеси ясно показва термомеханичния характер на процеса ДЗ, докато процесите RB и DR могат да се приемат за чисто механични. От друга страна, ДЗ осигурява по-малка грапавост, значително по-голяма микротвърдост, по-големи в по абсолютни стойности остатъчни напрежения на натиск, по-фина микроструктура и в резултат на това по-голяма якост на умора в сравнение с RB и DR.

5. *Оптимизационна процедура за повишаване на якостта на умора, микротвърдостта и дълбочината на уякчения слой, като функция на радиуса на върха на инструмента и силата на притискане на образци от нисколегирана въглеродна стомана 41Cr4*

Научни Трудове: 1.В.5;

Диамантното заглаждане е метод за модифициране на повърхността, насочен към подобряване на Surface Integrity (SI) и експлоатационното поведение на конструкционни елементи. Разработен е рентабилен оптимизационен подход за увеличаване на якостта на умора на образци от стомана обработени посредством диамантно заглаждане. Основната идея е, че якостта на умора може да се контролира чрез контролиране на някои от характеристиките на SI (повърхностна микротвърдост, дълбочина на уякчения слой и грапавост), чиито измерване не отнема време и са относително евтини за определяне. Поставена е и е решена многоцелева оптимизационна задача с помощта на метода на вектора на теглото. Управляващите фактори са радиусът на диаманта и силата на притискане. Получената граница на умора се различава от максималната граница на умора само с 0,44%, което доказва ефективността на предложения подход. Получените резултати за границата на умора са

обяснени с помощта на X-ray analysis на въведените остатъчни напрежения и анализ на микроструктурата на повърхностния и подповърхностните слоеве. Установено е, че по-голямата дълбочина на афектираната зона, съчетана с по-малък градиент в изменението на микроструктурата в дълбочина, осигурява по-голяма якост на умора.

6. Обзор на методите за slide burnishing

Научни Трудове: 1.В.10;

Статията представя обзор посветен на диамантното заглаждане (ДЗ) на конструкционни елементи. ДЗ принадлежи към групата на статичните методи за механична повърхностна обработка, използвани предимно в космическата, автомобилната и други индустрии. Посредством пластичната деформация на повърхностните слоеве се подобрява значително Surface integrity (SI) на съответния конструкционен елемент по отношение на минимална грапавост, микротвърдост и въведени остатъчни напрежения на натиск. В резултат на това устойчивостта срещу възникването на пукнатини от умора, устойчивостта на възникването на пукнатини в резултат на корозия, износостойчивостта и корозионната устойчивост се увеличават значително. Основната характеристика на ДЗ е контактът триене чрез плъзгане между деформиращия елемент и обработваната повърхност. Чрез диференциалния морфологичен метод е създадена интегрирана класификация на статичните методи и е очертана зоната на приложение на ДЗ. Предложената морфологична матрица, която може да бъде разширявана и допълвана, съдържа съществуващите методи за заглаждане, както и комбинации от елементи и взаимодействия, които могат да бъдат използвани за синтезиране на нови методи и инструменти за заглаждане. Освен това е направен литературен преглед на публикациите, посветени на ДЗ. Извършен е анализ на публикуваните изследвания по различни критерии и са направени графични визуализации на статистическите резултати. На тази база са направени съответните изводи и са очертани насоките за бъдещи изследвания на ДЗ.

7. Изследване на характеристиките на заварени съединения от метали с различни термофизични свойства посредством електронно лъчево заваряване

Научни Трудове: 1.Г.11, 2.Г.1

Статиите представят резултати от изследване на заварени съединения посредством електроннолъчево заваряване на образци от метали с различни термофизични свойства – чиста мед и аустенитна хром-никелова стомана AISI 30L. Експериментите са реализирани с и без отклонение на лъча към всеки един от двата метала от 0,3 mm и мощност на лъча от 2400, 3000 и 3600 W. Фазовият състав на получените заварени съединения е изследван чрез рентгенова дифракция (XRD); микроструктурата и химичният състав са изследвани съответно чрез сканираща електронна ми-

кроскопия (SEM) и енергийно-дисперсионна рентгенова спектроскопия (EDX). Механичните свойства са изследвани чрез провеждането на тестове на опън и определяне на микротвърдост.

8. *Подобряване на характеристиките на Surface Integrity и уморното поведение на конструкционни елементи от високояка алуминиева сплав 2024-T3 посредством повърхностно пластично деформиране с тороидална ролка*

Научни Трудове: 1.Г.8, 1.Г.9, 4.Г.5, 4.Г.6, 4.Г.9, 4.Г.10

Статиите представят изследвания на приложението на метод за повърхностно пластично деформиране с тороидална ролка върху образци от високояка алуминиева сплав 2024-T3

За осъществяване на натурните експерименти е разработен нов инструмент с възможност за промяна на деформиращата сила, ъгъла на нейното прилагане и тороидални ролки с различен радиус.

Посредством регресионни анализи и планиран числен експеримент на базата на специално разработен 3D KE модел са получени модели на максималната еквивалентна пластична деформация, дълбочината на пластично деформираната зона и полето с остатъчни окръжни и осови напрежения. На базата на планиран експеримент е извършена многоцелева оптимизация за определяне на геометричните параметри и силата на притискане на тороидалната ролка, водещи до позитивните ефекти от реализиране на процеса.

Проведените натурни експерименти върху образци подложени на въртеливо огъване установяват, че ограничената граница на умора за образци обработени с оптимални технологични параметри се увеличава с 38.4%, а дълготрайността на умора повече от 2000 пъти, в сравнение с образци обработени само чрез струговане.

9. *Изследване на параметрите на Surface integrity – микротвърдост, грапавост и микроструктура на алуминиева сплав 2024-T3 след диамантно заглаждане*

Научни Трудове: 1.Г.1, 3. Г.1, 4.Г.1, 4.Г.2;

Научните трудове представят резултати от изследването на процеса диамантно заглаждане върху подобряване характеристиките на повърхностните и подповърхностни слоеве, микроструктурата и уморното поведение на образци от алуминиева сплав 2024-T3.

Посредством планиран експеримент са определени технологичните параметри на процеса осигуряващи минимална грапавост. На тяхна база е направено разширено експериментално проучване за микротвърдостта и нейното разпределение в дълбочина. Въз основа на проведен микроструктурен металографски анализ е установен благоприятния микроефект от прилагането на диамантно заглаждане – забавяне

на момента в който се формира микропукантината, издробенена и хомогенизирана микроструктура на дълбочина до около 0,5 mm. Макроефектът дължащ се на създаването на зона с полезни остатъчни напрежения на натиск е доказан посредством натурен експеримент за определяне на дълбочината на зоната с полезни остатъчни напрежения. Полезния резултат от съвместното действие на микро и макро ефекта е доказан с проведените уморни тестове на въртеливо огъване. Границата на умора определена чрез използването на метода на Locati нараства от 175 МПа за образци обработени само чрез струговане до 250 МПа за образци обработени с диамантно заглаждане с един преход и без употреба на смазочно охлаждаща течност.

10. Повишаване на пукнатиноустойчивостта на отвори в наставови връзки посредством повърхностно пластична деформация

Научни Трудове: 1.Г.2;

Статията представя нова технология за обработка на отвори във връзките за наставови ЖП релси. Връзките са част от съединението между краищата на наставови ЖП релси, които са критично място за зараждане и разпространение на пукнатини от умора, причинени от циклично натоварване, дължащо се на преминаващи влакове. Вероятността от възникване на ъглови пукнатини, започващи от вътрешните повърхнини на отворите на връзката, е доказана с помощта на метода на крайните елементи (МКЕ). На тази основа се обосновава необходимостта от нова технология за повишаване устойчивостта срещу възникването на пукнатини на отворите във връзките. Технологията включва диамантно заглаждане (ДЗ) като довършващо обработване на тези отвори. Разработено е ново инструментално оборудване, включващо комбиниран режещ инструмент и устройство за ДЗ с еластична греда, задаващата необходимата сила на притискане. Оборудването е предназначено за фрезови машини и обработващи центри. Оптималните параметри на процесите на рязане и ДЗ се получават чрез планирани експерименти, регресионни анализи, генетичен алгоритъм и КЕ анализи. Разпределението на въведените полезни остатъчни окръжни напрежения се намира чрез провеждане на КЕ анализ на процеса ДЗ. Тези напрежения забавят зараждането и развитието на пукнатини от умора, стартиращи от повърхността на отвора. Както микроструктурния анализ посредством микроскоп, така и тестовете на умора доказват предимството на тази технология, изразяващо се в повишената устойчивост срещу появата и развитието на пукнатини около отворите на наставовите връзки.

11. Подход за подобряване на уморното поведение на скрепителни отвори в конструкционни елементи от алуминиева сплав 2024-T3 посредством повърхностно пластична деформация с инструмент с К-профил.

Научни Трудове: 1.Г.3, 4.Г.3, 4.Г.4;

Предложен е нов метод и инструмент за обработка на голям брой малки скрепителни отвори в конструкции от високояки Al сплави чрез студена пластична деформация. Извършени са експерименти с които са определени оптималните стойности на технологичните параметри на процеса, както и влиянето им върху енерг-силовите параметри – осова сила и въртящ момент. Посредством експеримент и 3D KE симулации са доказани три основни благоприятни ефекта: студено разширение на отвора, повърхностна пластична деформация и модификация на микроструктурата. Направена е интегрална оценка на предложените метод и инструмент чрез изпитвания на умора на цикличен опън. Получените S–N криви доказват, че дълготрайността на умора се увеличава значително в сравнение със случая само на пробити и райберовани отвори. Въз основа на проведените проучвания е проектиран и произведен суперкомбиниран инструмент, който последователно извършва пробиване, райбероване и студена пластична деформация. Този инструмент значително увеличава производителността при обработката на голям брой скрепителни отвори в конструкционни елементи от алуминиеви сплави.

12. KE подход, верифициран с натурни експерименти, за повишаване на уморната дълготрайност на образци от нисколегирана въглеродна стомана 41Cr4 подложени на диамантно заглаждане

Научни Трудове: 1.Г.6;

Диамантното заглаждане (ДЗ) е статичен метод за механична повърхностна обработка, базиран на въвеждането на пластична деформация на повърхността, реализирана чрез контакт триене при плъзгане между деформиращият елемент и обработваната повърхност. ДЗ подобрява значително драстично Surface integrity на конструкционни елементи и машинни компоненти. Тази статия е посветена на подобряване на якостта на умора на образци с форма на пясъчен часовник от стомана 41Cr4, подложени на ДЗ с инструмент с диамантен сферичен връх чрез различни комбинации от основни управляващи технологични параметри. Тъй като въведените остатъчни напрежения на натиск играят значителна роля за поведението на умора на обработените компоненти, бе проведено цялостно параметрично изследване на процеса ДЗ с помощта на напълно свързан термомеханичен анализ посредством МКЕ. Адекватността на KE модел бе доказана чрез сравнение на резултатите от KE анализ за остатъчните напрежения с измервания посредством рентгенов дифракционен анализ. Получените резултати показват, че радиусът на диаманта и силата на притискане имат най-силно изразен ефект върху остатъчните напрежения, които от своя страна оказват значително влияние върху якостта на умора, респективно на дълготрайността на умора. Проведено е обширно експериментално изследване на ефекта на избраните основни технологични параметри на ДЗ върху границата на умора на образци обработени чрез ДЗ с помощта на метода на Locatti. Последното се основава на хипотезата за линейно натрупване на повреди на Palmgren–Miner,

която е частен случай на общата теория за натрупаните повреди. Проведен е планиран експеримент, като управляващите фактори се установяват на четири нива. Извършен е регресионен анализ на експерименталните резултати и е получен модел за предсказване на границата на умора. Въз основа на получения модел е извършена едноцелева оптимизация с помощта на генетичен алгоритъм. При обработването на образци чрез оптималните технологични параметри границата на умора на обработените образци е повишена с 22,7% - от 440 на 540 МРа. Дълготрайността на умора се увеличава повече от 100 пъти след ДЗ с оптимални технологични параметри.

13. Сравнителен анализ реализиран посредством КЕ анализи на процеси за обработване на повърхностни слоеве

Научни Трудове: 1.Г.10;

Методите на статична механична обработка на повърхността (МОП), базирани на прилагането на много голяма пластична деформация на повърхностните и подповърхностните слоеве, подобряват значително Surface integrity (SI) на конструкционни елементи и по този начин техните експлоатационни свойства. Методът на крайните елементи (МКЕ) е основен метод за симулации, използван при числените изследвания на процеси за МОП. Въпреки че, МКЕ винаги изисква експериментална проверка на получените резултати и провеждането на експеримент за установяване на адекватен конститутивен модел на материала, този метод спестява на изследователя значително време и ресурси. Въз основа на анализ на публикуваните проучвания, посветени на FE симулации на статични МОП процеси, е установено, че съществени за получаването на адекватен КЕ модел са пет основни условия. Теоретичните формулировки са илюстрирани чрез създаване на FE модел на процеса Диамантно заглаждане (ДЗ) при използването на различни стратегии, за извършване на сравнителен анализ между тях. ДЗ е статичен МОП процес с термомеханичен характер. Адекватността на всеки КЕ модел, съответно стратегия, се оценява чрез сравняване на резултатите от КЕ за остатъчните напрежения с експерименталните резултати, получени чрез рентгенова дифракция. Извършен е напълно свързан термомеханичен 3D КЕ анализ на процеса ДЗ с нелинейно кинематично уякчаване. Установено че, че при относително ниска периферна скорост на обработване, топлинният ефект може да бъде пренебрегнат.

14. Подходи за оптимизация на *smoothing, deep or mixed burnishing* процеси на образци от нисколегирана въглеродна стомана 41Cr4

Научни Трудове: 1.Г.4;

Диамантното заглаждане (ДЗ) е статичен метод за механична повърхностна обработка, базирана на значителна повърхностна пластична деформация, насочена към значително подобряване на Surface integrity и експлоатационните свойства на обработвания компонент. Много често ДЗ неоснователно се възприема като само заглаждане. В настоящата статия е показано, че ДЗ може да се реализира като

smoothing, deep, or mixed burnishing в зависимост от конкретната комбинация от технологични параметри, управляващи процеса. Проведени са оптимизации на процеса ДЗ за стомана 41Cr4 по различни критерии, за да се получат оптималните технологични параметри на процеса ДЗ. Изборът на управляващи фактори и целеви функции (грапавост и граница на умора), които са получени въз основа на планирани експерименти и регресионни анализи, са напълно обосновани. Чрез едноцелеви оптимизации се получават безкомпромисните оптимални стойности на целевите функции и съответните оптимални стойности на управляващите фактори на ДЗ и deep burnishing. Разработена е нова оптимизационна процедура за решаване на многоцелева оптимизационна задача, с цел да се получат компромисни оптимални стойности едновременно за целевите функции и управляващите фактори при процеса ДЗ. За да се подчертаят предимствата на предложената процедура за оптимизация, решението на многоцелевата задача се сравнява с резултатите, получени чрез някои от известните методи, например чрез методът на тегловния вектор и методът базиран върху функция на загубите.

15. Сравнителен анализ между методи за разширение на скрепителни отвори на образци от алуминиева сплав D16AT върху уморната дълготрайност, базиран върху KE модели, уморни тестове и микроструктурен анализ

Научни Трудове: 1.Г.5;

Статията оценява Al-сплав D16AT използвана в аероиндустрията. Сравнени са методите friction stir hole expansion (FSHE), solid mandrel cold working and symmetric cold expansion (SCE). Резултатите са обобщени на базата на проведени тестове на умора, S–N криви, рентгенова дифрактометрия и микроструктурен анализ. В областта на малоциклова умора SCE осигурява повече от 66 пъти по-голяма дълготрайност на умора в сравнение с метода на solid mandrel cold working и повече от 82 пъти по-голяма дълготрайност на умора в сравнение с метода FSHE. Чрез рентгенова дифрактометрия беше установено, че по-високата ефективност на метода SCE се дължи на симетричното разпределение (по отношение на средната равнина на образеца) на остатъчните окръжни напрежения около отвора. От друга страна, методът solid mandrel cold working причинява значителен градиент на разпределението на остатъчните напрежения по дебелината на плоския образец, което е предпоставка за зараждане и разпространение на ъглови уморни пукнатини. Установено е, че ефективността на метода FSHE зависи основно от генерираната топлина и еквивалентната пластична деформация. Комбинацията от тези фактори определя благоприятния микроэффект от модифицирането на микроструктурата в близост до отвора и полезен макроефект, дължащ се на въведените остатъчни напрежения на натиск. Методът SCE трябва да се използва за предварително обработване на скрепителни отвори в

най-натоварените компоненти от алуминиева сплав D16AT крила и фюзелаж на самолета, докато методът FSHE може да се прилага за обработка на скрепителни отвори в по-малко натоварени конструкционни елементи на самолета.

16. Сравнително експериментално изследване на получаваната грапавост на образци от ниско, средно въглеродна и инструментална стомани подложени на диамантно заглаждане

Научни Трудове: 4.Г.8;

В статията е изследван процесът на диамантно заглаждане на цилиндрични образци, изработени от три вида конструкционни стомани (нисковъглеродна стомана S235, средно въглеродна стомана 45 и инструментална стомана Y8A). Обект на изследване е влиянието на параметрите на процеса върху получената грапавост. Основните технологични параметри (сила на притискане, радиус на върха на диаманта, подаване и брой преходи) са изследвани чрез експериментален подход. За целта е разработена методика включваща три етапа. В резултат на първия етап са определени петте най-добри комбинации за силата на притискане и радиуса на върха на диаманта при постоянна скорост и подаване. На тази основа във втория етап е изследвано влиянието на подаването. След приключване на втория етап са определени оптималните основни параметри на процеса диамантно заглаждане, осигуряващи минимална грапавост. В третия етап е изследвано влиянието на броя на преходите. Броят на преходите варира между един и осем прехода за два вида работни схеми – еднопосочна и разнопосочна схема. При еднопосочната схема на реализиране на процеса е получена минималната грапавост $R_a = 0.109 \mu m$ за инструменталната стомана. За трите изследвани стомани подобрението на грапавостта е по-голямо при еднопосочната работна схема. Разнопосочната схема не се препоръчва за стомана S235, тъй като получената грапавост е с минимална стойност след първия преход. В условията на разнопосочната схема на работа за средно въглеродна стомана 45 грапавостта намалява до шестия прехода, след което се увеличава. Това намаление обаче е 19%, докато при еднопосочната схема достига 31%. Както и при прилагането на процеса диамантно заглаждане върху други материали, експерименталните резултати потвърждават, че факторите от с най-голяма тежест за получаваната грапавост са силата на притискане и радиусът на върха на диаманта.