



CLASSIFICATION OF THE DEVICES AND TOOLS FOR HOLE BURNISHING

Desislava Drumeva*

Technical University of Gabrovo, 5300 Gabrovo, Bulgaria

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 April 2021

Accepted 15 May 2021

Keywords:

morphological classification scheme, hole burnishing, devices/tools

ABSTRACT

In this article a morphological classification scheme of devices/tools for hole burnishing is proposed. The classification scheme has a hierarchical structure containing uniquely marked elements at three levels. It is based on four main characteristics of the devices/tools for hole burnishing. Based on the matrices of the selected main characteristics, the combinations corresponding to different functional schemes of existing devices/tools for hole burnishing were defined. On this basis, an analysis of the corresponding devices/tools was made in the context of their field of application.

© 2021 Journal of the Technical University of Gabrovo. All rights reserved.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Отворите са най-често срещаните естествени концентратори в металните конструкционни и машинни елементи. В повечето индустриални приложения през отворите преминава значителен силов поток (отвори за болтови и нитови съединения) или са подложени на относителни премествания (отвори в хидро- и пневмоцилиндри, втулки за плъзгащи лагери). И в двата случая жизнения цикъл на съответните конструкционни елементи в най-голяма степен зависи от състоянието на материала около отворите, определено от т.н. Surface Integrity (SI). От гледна точка на подобряване на трибологичното, уморното поведение и корозионната устойчивост на конструкционните елементи е необходимо да се постигне SI на повърхностните слоеве около отворите, характеризиращо се с ниска грапавост, повишена микротвърдост, полезни остатъчни напрежения на натиск и модифицирана микроструктура. В този аспект доказано ефективен подход е механичното повърхностно третиране на повърхностните слоеве (mechanical surface treatment). В основата му е повърхностно пластично деформиране (ППД) на върховете на микрограпавините вследствие от силов контакт взаимодействие между деформиращ елемент/и и обработваната повърхност. Върховете на повърхностния микро-релеф се деформират пластично, като материалът тече по посока на падините. Физически този процес се свързва с т.н. деформационно уякчаване, видимият позитивен ефект от който е заглаждането на повърхността. Според начина на прилагане на деформиращото въздействие съществуват две групи методи за ППД: статични и динамични [1]. Динамичните методи (shot peening, laser peening, water cavitation peening) са ефективни при обработване на сложни профилни повърхнини. Статичните методи се

свързват с т.н. burnishing технологии и са подходящи за довършващо обработване на ротационни елементи. При статичните методи ротационен деформиращ елемент/и се притиска/притискат статично към обработваната повърхност, като процесът на деформация е непрекъснат във времето. Това позволява да се управляват параметрите на съответния процес в корелация с желания комплекс от характеристики на повърхностните слоеве, т.е. в корелация със SI [2]. За конкретни материал, геометрия и условия на експлоатация, жизненият цикъл на конструкционните елементи зависи от състоянието на повърхностните слоеве непосредствено преди въвеждането им в експлоатация, респ. от SI. Поради това статичните методи за ППД намират по-голямо приложение в инженерната практика.

Прегледът на литературата, посветена на статичните процеси за ППД, показва, че изследователите използват различни термини за идентифициране на съответните процеси [1]. Например често използваният термин roller/ball burnishing се свързва с формата на деформиращия елемент/и, а не с вида на тангенциалния контакт – триене при търкаляне или триене при плъзгане. Задълбочен сравнителен анализ, посветен на значението на вида на тангенциалния контакт върху SI и уморното поведение, е направен от Maximov et al. [3]. Експериментално и посредством числени симулации авторите доказват, че при еднаква форма на деформиращия елемент, различният тангенциален контакт определя различен процес, резултатът от който е различно SI, а оттам и различно експлоатационно поведение. Често процесът диамантно заглаждане, реализиран с контакт триене при плъзгане чрез диамантен деформиращ елемент (предимно синтетичен диамант) със сферична форма, се отнася към термина ball burnishing. Същевременно, в научните публикации един

* Corresponding author. E-mail: ddrumeva7@gmail.com

и същи термин се използва за наименование както на метод, така и на процес. Например “roller burnishing” в контекст на метод се асоциира с използването на деформираща ролка/ролки, а компанията Esogoll е въвела този термин за идентифициране на процес, в който целта е получаването на много ниска грапавост (почти огледални повърхнини) и висока точност на формата [4].

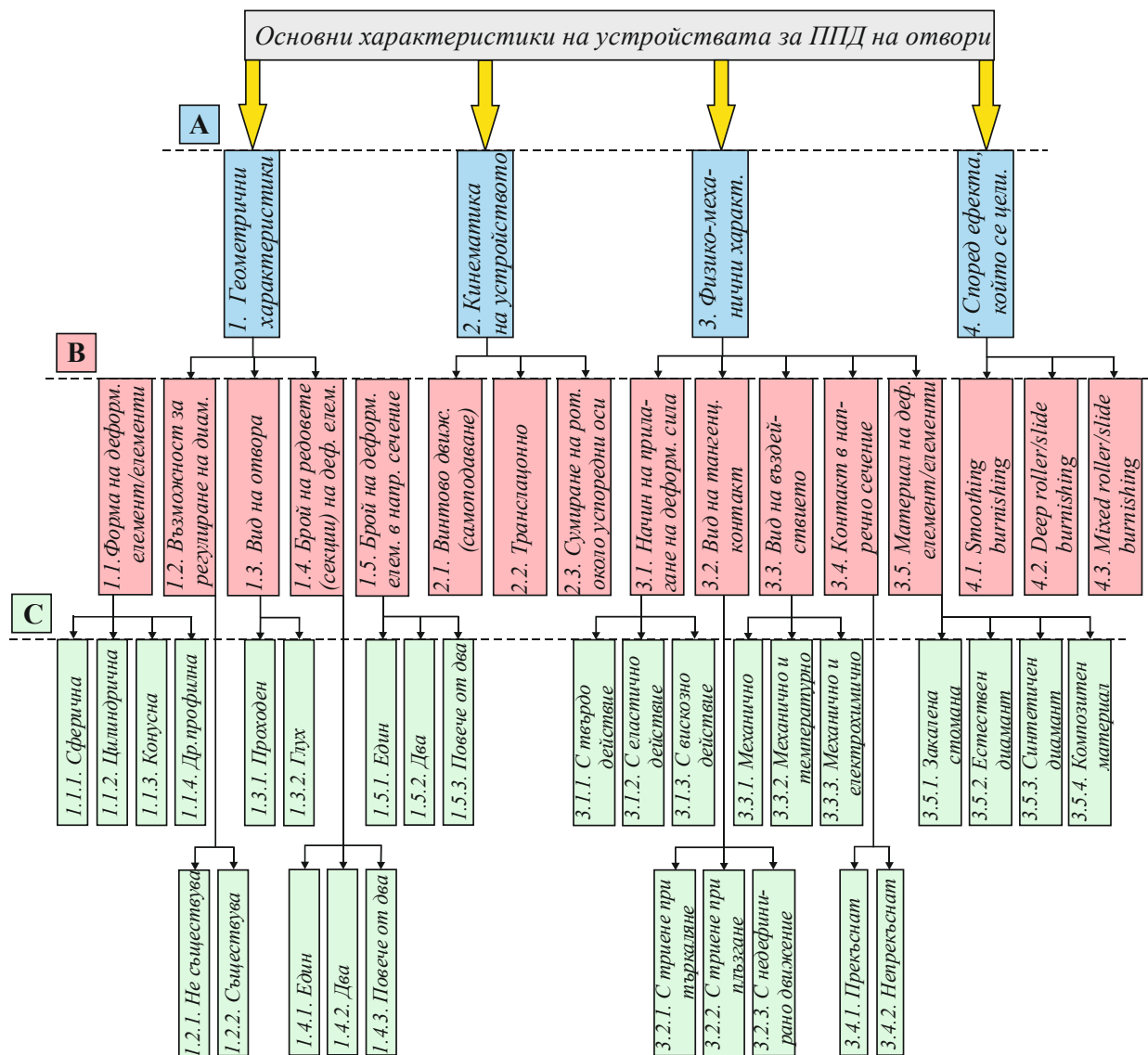
От друга страна, до голяма степен възможността за управление на параметрите на съответния статичен процес за ППД технически зависи от конкретното устройство, с което процесът се реализира. Липсата на общоприета терминология в областта на burnishing

технологиите рефлектира върху избора на подходящо устройство.

В настоящата статия, прилагайки системния подход, е разработена морфологична класификационна схема на устройствата и инструментите за ППД на отвори. На тази основа, в корелация с желаната комбинация SI, е направен анализ на съществуващи функционални схеми на устройства за ППД на вътрешни отвори.

2. КЛАСИФИКАЦИОННА СХЕМА

Разработената морфологична класификационна схема, в съответствие с [5], е показана на фиг. 1.



Фиг. 1 Морфологична класификационна схема на устройства за ППД на отвори

Класификационната схема има йерархична структура, базирана върху четири основни характеристики на устройствата за ППД на отвори, дефинирани на ниво „А“, както следва:

- А.1. Геометрични характеристики;
- А.2. Кинематика на устройството;
- А.3. Физико-механични характеристики;
- А.4. Според ефекта, който се цели (при съответния процес за ППД).

На ниво „В“ са дефинирани съответните морфологични подпризнаци от втори ред, означени с двуцифров код. Според спецификата на основните характеристики

с номера 1 и 3 в класификационната схема са посочени и морфологични признаци от трети ред, означени със съответен трицифров код (ниво „С“). В съответствие с морфологичната класификационна схема от фиг. 1 на основните групи характеристики ще съответстват следните четири матрици:

- Матрица на геометричните характеристики:

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1.1.1 & 1.2.1 & 1.3.1 & 1.4.1 & 1.5.1 \\ 1.1.2 & 1.2.2 & 1.3.2 & 1.4.2 & 1.5.2 \\ 1.1.3 & 0 & 0 & 1.4.3 & 1.5.3 \\ 1.1.4 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

• Матрица на кинематиката на устройството/инструмента:

$$M_2 = \begin{bmatrix} 2.1 \\ 2.2 \\ 2.3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

• Матрица на физико-механичните характеристики:

$$M_3 = \begin{bmatrix} 3.1.1 & 3.2.1 & 3.3.1 & 3.4.1 & 3.5.1 \\ 3.1.2 & 3.2.2 & 3.3.2 & 3.4.2 & 3.5.2 \\ 3.1.3 & 3.2.3 & 3.3.3 & 0 & 3.5.3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3.5.4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

• Матрица на вида на процеса (според ефекта, който се цели):

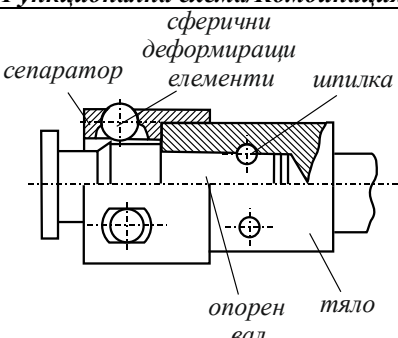
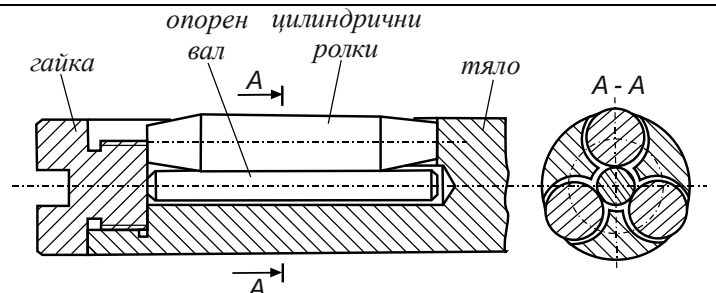
$$M_4 = \begin{bmatrix} 4.1 \\ 4.2 \\ 4.3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

На основа на матриците, дефинирани според (1) – (4), всяка реално изгълнима функционална схема на устройство за ППД на отвори може да се означи с комбинация, съдържаща по един елемент от всеки стълб на горните матрици.




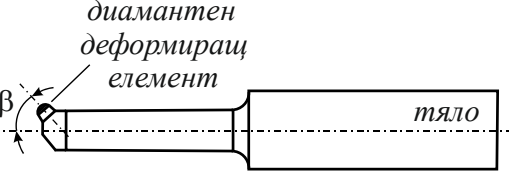
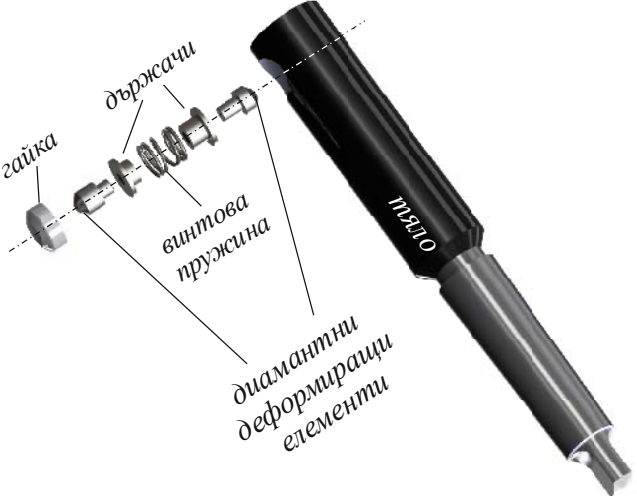
3. АНАЛИЗ НА СЪЩЕСТВУВАЩИ ФУНКЦИОНАЛНИ СХЕМИ НА УСТРОЙСТВА ЗА ППД НА ОТВОРИ

В таблица 1 са показани функционални схеми на известни в литературата устройства и инструменти за ППД на отвори, както и съответстващите им комбинации, дефиниращи морфологичните признаци според матриците (1) – (4). Изборът на дадена комбинация от морфологични признаци на устройство/инструмент за ППД на отвори до голяма степен се определя от състоянието на повърхнината на самия отвор (диаметър, дължина, проходен или глух отвор, точност на размера и формата). В този аспект от определящо значение е начинът на прилагане на деформиращото въздействие (табл. 1, морфологичен признак 3.1). При устройствата/инструментите с твърдо действие качеството на повърхнината зависи от разпределението на големината на размерообразуващата прибавка за деформиране, респ. от точността на предшестващата обработка. Устройства/инструменти с твърдо действие са показаните с позиции 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 14 и 15. Във вариант на сепараторни инструменти с множество деформиращи елементи (сфери или ролки) те са предпочитани за обработване на проходни и глухи отвори с широк диапазон диаметри, за които се изисква много ниска грапавост и висока точност на формата (smoothing burnishing – фиг. 1, морфологичен признак 4.1.). Предимство на инструмента, показан на поз. 1, е елиминирането на нежелани следи следствие от еластичните деформации при изваждането му от обработения отвор [6]. Следствие на силите от триене сепараторът се премества в посока, обратна на движението на инструмента, като деформиращите елементи попадат върху по-малкия диаметър на опорния вал. Ролковият инструмент с твърдо действие, показан на поз. 2, е предназначен за обработване на малки отвори [6]. Негово предимство е възможността за изменение на диаметъра на обработвания отвор (табл. 1, морфологичен признак 1.2.) в относително тесен диапазон чрез промяна на диаметъра на опорния вал.

Таблица 1

№	Функционална схема/Комбинация
1	<p>сферични деформиращи елементи и шилка</p>  <p>[1.1.1 1.2.1 1.3.1 1.4.1 1.5.3 2.2 3.1.1 3.2.1 3.3.1 3.4.1 3.5.1 4.1]</p>
2	<p>опорен цилиндрични ролки</p>  <p>[1.1.2 1.2.2 1.3.1 1.4.1 1.5.3 2.2 3.1.1 3.2.1 3.3.1 3.4.1 3.5.1 4.1]</p>

<p>3</p>	<p>[1.1.3 1.2.2 1.3.1 1.4.1 1.5.3 2.2 3.1.1 3.2.1 3.3.1 3.4.1 3.5.1 4.1]</p>
<p>4</p>	<p>[1.1.2 1.2.1 1.3.1 1.4.1 1.5.3 2.1 3.1.2 3.2.1 3.3.1 3.4.1 3.5.1 4.1]</p>
<p>5</p>	<p>[1.1.2 1.2.2 1.3.1 1.4.1 1.5.3 2.2 3.1.1 3.2.1 3.3.1 3.4.1 3.5.1 4.1]</p>
<p>6</p>	<p>[1.1.2 1.2.2 1.3.1 1.4.1 1.5.3 2.1 3.1.1 3.2.1 3.3.1 3.4.1 3.5.1 4.1]</p>
<p>7</p>	<p>[1.1.2 1.2.2 1.3.2 1.4.1 1.5.3 2.2 3.1.1 3.2.1 3.3.1 3.4.1 3.5.1 4.1]</p>

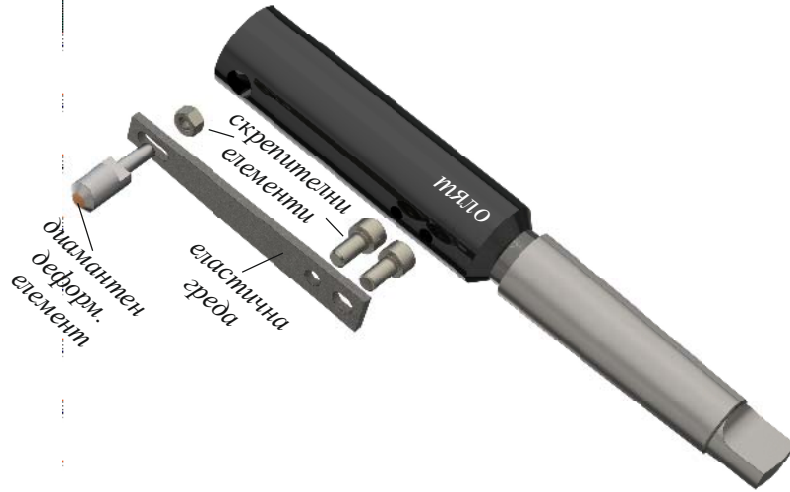
<p>8</p>	 <p>[1.1.2 1.2.2 1.3.1 1.4.3 1.5.3 2.2 3.1.1 3.2.1 3.3.1 3.4.1 3.5.1 4.1]</p>
<p>9</p>	 <p>[1.1.1 1.2.1 1.3.1 1.4.2 1.5.1 2.1 3.1.3 3.2.1 3.3.1 3.4.1 3.5.4 4.2]</p>
<p>10</p>	 <p>[1.1.1 1.2.1 1.3.1 1.4.1 1.5.1 2.1 3.1.1 3.2.3 3.3.1 3.4.1 3.5.1 4.1]</p>
<p>11</p>	 <p>[1.1.1 1.2.1 1.3.1 1.4.1 1.5.1 2.1 3.1.1 3.2.2 3.3.1 3.4.1 3.5.3 4.3]</p>
<p>12</p>	 <p>а.</p>



б.

[1.1.1 1.2.1 1.3.1 1.4.1 1.5.2 2.1 3.1.2 3.2.2 3.3.1 3.4.1 3.5.3 4.3]

13



а.



б.

[1.1.1 1.2.2 1.3.1 1.4.1 1.5.1 2.1 3.1.2 3.2.2 3.3.1 3.4.1 3.5.3 4.2]

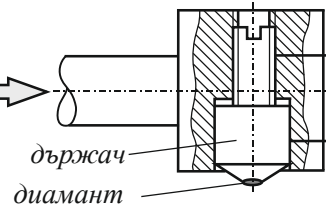
14



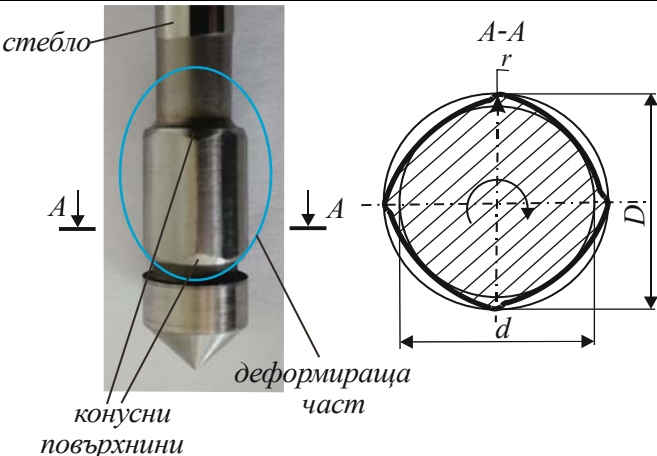
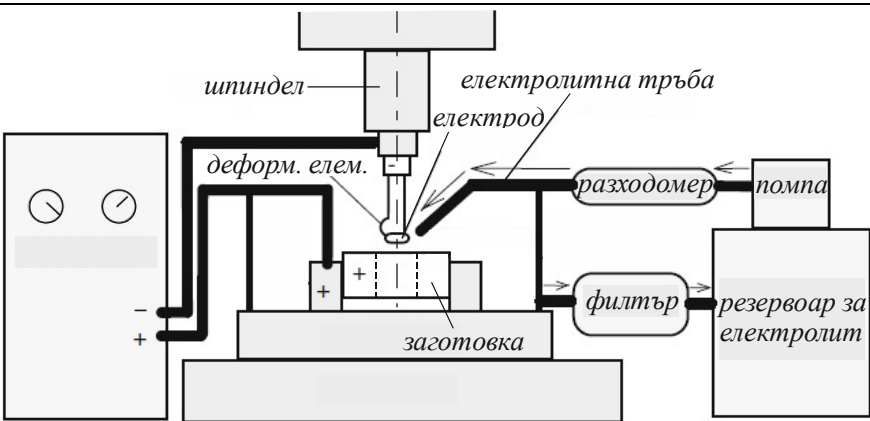
а.



б.



[1.1.1 1.2.2 1.3.1 1.4.1 1.5.1 2.1 3.1.2 3.2.2 3.3.1 3.4.1 3.5.3 4.3]

15	 <p>[1.1.4 1.2.1 1.3.1 1.4.1 1.5.1 2.1 3.1.1 3.2.2 3.3.1 3.4.1 3.5.1 4.3]</p>
16	 <p>[1.1.1 1.2.1 1.3.1 1.4.1 1.5.1 2.1 3.1.1 3.2.2 3.3.3 3.4.1 3.5.4 4.1]</p>

Предимство на функционалните схеми на сепараторните многоролкови инструменти, показани на поз. 3 и 4, е възможността за регулиране на диаметъра на обработвания отвор (в относително тесен интервал – в рамките на допускателен интервал) посредством осово изместване на сепаратора, респ. на конусните ролки по отношение на конусната повърхнина на опорния вал [6]. В инженерната практика преобладаващо се използват сепараторни инструменти на компаниите Ecoroll [4], Yamasa [7], Yamato [8], Cogsdill [9] с цилиндрични или конусни ролки, разположени по направление на образуващи от цилиндричната повърхнина (поз. 2, 3, 4, 5, 8) или тангенциално ориентирани (със самоподаване) (поз. 6). Инструментът, показан на поз. 8, съдържа три секции деформиращи ролки [4]. Многоролковите инструменти се използват както за ППД на проходни отвори, така и за глухи такива (поз. 7). Компанията Ecoroll е разработила широка номенклатура инструменти за ППД на отвори, използвайки само контакт триене при търкаляне. Ecoroll презентира две основни концепции - roller burnishing и deer rolling, акцентирайки върху ефекта, който се цели да се постигне [4]. Процесът roller burnishing има за цел да се постигне преди всичко много ниска грапавост (почти огледални повърхнини) и висока точност на формата и размерите, а позитивните ефекти от уякчаване и създаване на полезни остатъчни напрежения в повърхностните слоеве са символични. За реализацията му се използват именно сепараторни многоролкови инструменти, за които е присъща относително по-малка степен на еквивалентна пластична деформация (cold work).

Характерна особеност на инструмента, показан в табл. 1, поз. 10, е възможността както за чисто търкаляне, така и плъзгане на деформиращата сфера по отношение на повърхнината на отвора [10]. Наблюдава се в устройствата/инструменти, в които деформиращата сфера контактува с по-малки опорни сачми или твърда повърхнина. За такива случаи в [1] е въведен терминът „недефинирано движение“ на деформиращата сфера. В зависимост от съотношението във времето между коефициента на триене между деформиращата сфера и обработваната повърхнина от една страна, и този между деформиращата сфера и опорните сачми – от друга страна, е възможно чисто търкаляне или плъзгане. Може да се предположи, че променяният се тангенциален контакт ще рефлектира в разсейване на физико-механично състояние на повърхностния слой.

Концепцията deer rolling се прилага върху конструкционни елементи, за повърхностните слоеве на които се изисква относително по-голямо уякчаване и създаване на зона с полезни остатъчни напрежения на натиск. Такива са елементите, чиято експлоатация е в условията на динамично механично и/или температурно натоварване. Един от най-широко използваните методи, реализиращи концепцията deer rolling, е ППД с деформираща сфера, подложена на хидростатично налягане (hydrostatic ball burnishing) [4]. В този случай деформиращото въздействие се прилага вискозно (морфологичен признак 3.1.3.). Диаметърът на отворите, за които са предназначени инструментите, реализиращи процеса hydrostatic ball burnishing, са ограничени по конструктивни причини (минималният обработван диаметър е 19 mm). Друг недостатък е необходимостта

от специална преносима станция за високо налягане. Инструментът, показан на поз. 9, е предназначен за ППД на относително по-дълги отвори, тъй като съдържа две деформиращи сфери, подложени на хидростатично налягане, които са позиционирани в две отделни напречни сечения. Тази концепция от една страна осигурява по-голяма стабилност на системата „инструмент – заготовка“ в процеса на ППД, а от друга страна, втората деформираща сфера преминава през вече обработена повърхнина, т.е. с един инструмент практически се реализира процес на ППД с два прехода. В резултат се постигат подобрени характеристики на SI.

Устройствата, показани на поз. 11-14, са предназначени за реализиране на процеса диамантно заглаждане, характеризиращ се с тангенциален контакт триене при плъзгане (slide burnishing) (морфологичен признак 3.2.2.) [11]. Предимство на инструмента за диамантно заглаждане с твърдо действие (поз.11) е простата му конструкция.

При функционалните схеми, показани на поз. 4, 12, 13 и 14, деформиращото въздействие се осигурява от еластична система (морфологичен признак 3.1.2). При този начин на прилагане на деформиращото въздействие технологичната наследственост е определяща за точността на формата на обработвания отвор, тъй като практически последната се откопирва. При инструмента, показан на поз. 4, тази функция се изпълнява от подходящо оформена конусна втулка [6]. Винтовите цилиндрични пружини са предпочитани елементи в инструментите за ППД, тъй като осигуряват линеен закон на прилагане на деформиращото въздействие. Това позволява лесно да се задава големината на деформиращата сила. Показаните на поз. 12 и 13 устройства е еластично действие са предназначени за диамантно заглаждане на отворите в краищата на жп релсите и са изобретени от Максимов и др. [12]. В устройството с двустранно действие (поз. 12) деформиращото въздействие върху двата диаметрално разположени диамантни деформиращи елементи се осигурява от винтова цилиндрична пружина на натиск. Тази функционална схема позволява процесът да се реализира с два пъти по-голямо подаване, което ще увеличи производителността при обработване. В устройството, показано на поз. 13, големината на деформиращата сила се задава чрез огъвната деформация на еластична греда [12]. Тази идея е използвана и в устройството, показано на поз. 14, предназначено за обработване на скрепителните отвори в т.н. настави в наставовите възли в жп релсите [13]. Функционалната схема, базирана върху еластична греда, предопределя едностранното действие на съответните устройства. Чрез използване на деформиращи елементи с различни дължини, устройствата, показани на поз. 12, 13 и 14, позволяват да се обработват отвори в определен диапазон на изменение на диаметъра им.

В табл. 1, поз. 15 е показан специален инструмент, на основа на който е разработен метод за довършващо обработване на малки скрепителни отвори във високояка алуминиева сплав 2024-T3 [14]. Методът се реализира върху конвенционални металорежещи машини, така, че инструментът извършва винтово движение по отношение на неподвижната заготовка. Характерна особеност на инструмента е геометрията на работната му деформираща част, чието напречно сечение е близко до т.н. К-профил. Тази геометрия води до по-плътен

контакт, но прекъснат контакт с повърхнината на отвора, което е предпоставка за едновременно постигане на три ефекта: студено разширение на отвора (cold hole expansion), ППД и модификация на микроструктурата. Разликата между диаметъра D на описаната около деформиращата работна част на инструмента и началния диаметър на отвора определя стегнатостта, без която не може да се постигне студено пластично деформиране. От друга страна, за да се осъществи студено разширение на отвора, е необходимо стегнатостта да бъде по-голяма от началната грапавост на повърхнината на отвора, определена чрез параметъра $R_z \cdot SPD$ се реализира от деформиращите се ръбове на инструмента, създавайки въртяща се деформационна вълна. Всяка точка от обработена повърхност на отвора се подлага многократно на въздействието на деформиращите ръбове, което е предпоставка за значително уякчаване на повърхностния слой. Прекъснатият контакт в напречното сечение благоприятства достигането на смазка до всяка точка от повърхността на отвора, и оттам постигане на по-ниска грапавост. Ефектът на модифициране на микроструктурата се дължи на контакта триене при плъзгане между деформиращата част на инструмента и повърхността на отвора. Една от съвременните техники, приложима за обработване на отвори в алуминиеви сплави, е техниката Friction Stir Hole Expansion, за която е присъщ непрекъснат контакт в напречно сечение (морфологичен признак 3.4.2.) [15].

В табл. 1, поз. 16, е показана функционална схема на инструмент за довършващо обработване на отвори, в който механичното въздействие се комбинира с електрохимично (морфологичен признак 3.3.3.) [16]. Тази комбинирана техника е подходяща за трудно-обработваеми материали – например инструментална стомана SKH57. Инструментът включва подходящо оформена деформираща част и електрод, комбинираното действие на които осигурява подобрена грапавост на отвора в сравнение с тази, получена съответно след конвенционалния случай на ППД или само електрохимична обработка на отвора. Предимство на тази техника е малкото необходимо време за обработване. Недостатък е необходимостта от по-сложно оборудване, изискващо наличие на химически активна среда.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прилагайки системния подход е разработена морфологична класификационна схема на известни от литературата устройства/инструменти за ППД на отвори. Класификационната схема има йерархична структура, съдържаща еднозначно означени елементи на три нива. В основата ѝ са избрани четири основни характеристики на устройствата/инструментите за ППД на отвори. Чрез съчетаване на елементите в матриците на избраните основни характеристики са дефинирани комбинациите, съответстващи на различни функционални схеми на съществуващи устройства/инструменти за ППД на отвори. На тази основа е направен анализ на съответните устройства/инструменти в контекста на областта им на приложение.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Maximov J.T., Duncheva G.V., Anchev A.P., Ichkova M.D. Slide burnishing—review and prospects. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 104 (2019) 785-801

- [2] R. M'Saoubi, A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products. *Int. J. Sustainable Manufacturing*, 1 (1-2) (2008) 203-236
- [3] Maximov J.T., Duncheva G.V., Anchev A.P., Dunchev V.P. Slide burnishing versus deep rolling - a comparative analysis. *Int J Adv Manuf Technol* 110 (7-8) (2020) 1923-1939
- [4] Ecoroll Catalogue "Tools & Solutions for Metal Surface Improvement" Ecoroll Corporation Tool Technology (2006) USA
- [5] Kuznetsov J.N., Guidelines for the application of the system-morphological method of finding new technical solutions. Kiev, KPI, 1985
- [6] Suchkov A.G., Kostadinov V.S., Kyrshakov M.K., Grigorov V.I., Kynev I.T. Finishing by means of surface plastic deformation. *Tehnicos Sofia* (1984)
- [7] <https://yamasa.com.tr/137/2/6/yamasa/internalrollerburnishing.aspx>
- [8] https://www.yamatoroll.eu/?gclid=Cj0KCQjwseDBhC7ARIsA18YcWJN_rFW5ei19tlx2vun9yDYdcqq3EpTxTEj6-5tC5rzzlhi4CWGf8IaAjrDEALw_wcB
- [9] <https://cogsdill.com/products/burnishing-tools/>
- [10] M.H. El-Axir, Othmanb O.M., Abodienac A.M., Improvements in out-of-roundness and microhardness of inner surfaces by internal ball burnishing process. *Journal of materials processing technology* 196 (2008) 120–128
- [11] Maximov J., Duncheva G., Amudjev I., Anchev A., Dunchev V. *Diamond Burnishing*. Ex-Press. Gabrovo. (2021)
- [12] Maximov J., Duncheva G., Amudjev I. Device for finishing rotary surfaces. Patent for invention №67002, з.№ 111527/05.07.2013
- [13] Maximov J.T., Duncheva G.V., Anchev A.P., Dunchev V.P., Crack resistance enhancement of joint bar holes by slide diamond burnishing using new tool equipment. *Int J Adv Manuf Technol* 102 3151-3164
- [14] Maximov J.T., Duncheva G.V., Anchev A.P., Amudjev I.M., New method and tool for increasing fatigue life of a large number of small fastener holes in 2024-T3 Al alloy. *J Braz Soc Mech Sci Eng* (2019) 41: 203
- [15] Duncheva G.V., Maximov J.T., Ganev N. A new conception for enhancement of fatigue life of large number of fastener holes in aircraft structures. *Fatigue Fract Eng Mater Struct* (2016) doi: 10.1111/ffe
- [16] Pa P.S., Continuous finishing processes using a combination of burnishing and electrochemical finishing on bore surfaces. *Int J Adv Manuf Technol* 49 (2010) 147–154