



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-ГАБРОВО

Факултет „Машиностроене и уредостроене“

маг. инж. Христо Цветанов Радев

**ИЗСЛЕДВАНЕ ПРОЦЕСА НА ФОРМООБРАЗУВАНЕ НА
ВЪТРЕШНИ РЕЗБИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за придобиване на образователна и научна степен „доктор“

Област на висше образование: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.1 Машинно инженерство

Докторска програма: Рязане на материалите и режещи
инструменти

Габрово, 2025 г.



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-ГАБРОВО

Факултет „Машиностроене и уредостроене ”

маг. инж. Христо Цветанов Радев

ИЗСЛЕДВАНЕ ПРОЦЕСА НА ФОРМООБРАЗУВАНЕ НА ВЪТРЕШНИ РЕЗБИ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за придобиване на образователна и научна степен „доктор”

Област на висше образование: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.1 Машинно инженерство

Докторска програма: Рязане на материалите и режещи
инструменти

Научни ръководители: Проф. д-р инж. Ирина Стефанова
Александрова

доц. д-р инж. Ненко Ганев Ненков

Рецензенти: проф. д-тн инж. Йордан Тодоров Максимов
проф. д-р инж. Галина Иванова Николчева

Габрово, 2025 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за официална защита на заседание на Разширен катедрен съвет на катедра „Машиностроителна техника и технологии“ към факултет „Машиностроене и уредостроене“ на Технически университет – Габрово, проведен на 20.02.2025 г.

Дисертационният труд съдържа 152 страници и приложение. Научното съдържание е представено в увод, 4 глави и заключение и включва 82 фигури и 28 таблици. Цитирани са 169 литературни източника. Номерацията на фигурите, таблиците и формулите в автореферата е в съответствие с тази в дисертацията.

Разработката/изследванията на/по дисертационния труд е/са извършена/и в катедра „Машиностроителна техника и технологии“, катедра „Материалознание и механика на материалите“ към факултет „Машиностроене и уредостроене“ на Технически университет – Габрово и във фирма „Резбонарезни инструменти Габрово ЕООД“ гр. Габрово

Официалната защита на дисертационния труд ще се състои на от ч. в Заседателна зала, сграда Ректорат на Технически университет – Габрово.

Автор: Христо Цветанов Радев

e-mail: hradew81@abv.bg

Заглавие: ИЗСЛЕДВАНЕ ПРОЦЕСА НА ФОРМООБРАЗУВАНЕ НА ВЪТРЕШНИ РЕЗБИ

Тираж: 3 бр.

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Изработването на вътрешни скрепителни резби намира широко приложение в съвременното машиностроене, обусловено от факта, че над 70% от обработваните детайли имат резбови отвори. Обработването на вътрешни резби, особено с малки размери (M5 – M12), представлява технологичен проблем, породен от недостатъчната якост и надеждност на използваните инструменти. Това налага непрекъснато усъвършенстване на конструкциите на инструментите, оптимизация на геометрията на работните им части и подобряване на технологията за изработването им с цел повишаване на тяхната надеждност и работоспособност.

Систематизирането и анализирането на методите и инструментите за формообразуване на вътрешни резби с диаметър до 12 mm показват, че най-широко използваните инструменти са метчиците. В зависимост от методите за формообразуване на резбата те се класифицират в три основни групи – режещи, деформиращи (безстружкови) и комбинирани – режещо-деформиращи.

За обезпечаване на високо качество на вътрешните резби по отношение на геометрична точност, грапавост и якостни параметри, съчетано с повишена якост и надеждност на инструментите е създадена нова конструкция режещо-деформиращи метчици за обработване на резби.

В дисертационния труд са представени резултатите от проведеното комплексно (теоретично и експериментално) изследване и моделиране на работоспособността на новосъздадената конструкция режещо-деформиращи метчици при формообразуване на резби в материали с различни физикомеханични свойства. Определени са оптималните работни условия които, гарантират от една страна работоспособност на инструментите, а от друга – качество на обработената резба.

Цел и задачи на дисертационния труд

Основната цел на дисертационната работа е оптимизация на работните условия при формообразуване на резби в материали с различни физикомеханични свойства с новосъздадена конструкция режещо-деформиращи метчици.

В настоящото изследване са решени следните основни задачи:

- Анализ на процеса на формообразуване на резби и на технологичните възможности на различни видове резбообработващи инструменти.
- Теоретично изследване на формообразуването на резби с режещо-деформиращи метчици и определяне на диаметъра на предварително обработения отвор в зависимост от физикомеханичните свойства на обработвания материал.
- Експериментално изследване и моделиране на работоспособността на режещо-деформиращи метчици по параметъра въртящ момент M_e при формообразуване на резби в материали с различни физикомеханични свойства (цветни метали и сплави – алуминиева сплав $Al2024T3$, мед Cu 99,9% и месинг $CuZn39Pb3$; ниско- и средновъглеродни стомани $C10$ и $C50$).
- Оптимизиране на работните условия при формообразуване на резби с режещо-деформиращи метчици в материали с различни физикомеханични свойства (цветни метали и сплави и ниско- и средновъглеродни стомани).
- Изследване и анализ на структурата и микротвърдостта на повърхнини, обработени с режещо-деформиращи метчици, на образци от материали с различни физикомеханични свойства.
- Сравнително изследване на работоспособността на режещи, деформиращи и режещо-деформиращи метчици при обработване на цветни метали и сплави и на ниско- и средновъглеродни стомани.

Методи на изследване

Представените в работата изследвания са осъществени със съвременни и адекватни за решаване на поставените задачи методи и технически средства. Приложени са методи за моделиране, статистическа обработка и анализ на експерименталните резултати, планиране на експериментите и оптимизиране посредством специализиран софтуер.

Научна новост

Научната новост се заключава в:

- Определяне на аналитични зависимости за диаметъра на предварително обработените отвори в зависимост от диаметъра на формообразуваната резба, съотношението на прибавките за рязане и пластична деформация и физикомеханичните свойства на обработваните материали.
- Построяване на теоретико-експериментални модели за максималния въртящ момент $M_{\text{Вmax}}$, при формообразуване на резби в цветни метали и сплави – алуминиева сплав $Al2024T3$, мед Cu 99,9% и месинг $CuZn39Pb3$, и ниско- и средновъглеродни стомани – $C10$ и $C50$ в зависимост от влиянието на диаметъра на предварително обработеният отвор d_0 , ъгъла на наклона на стружковия канал на инструмента λ_s и дължината на резбата L .
- Определяне на оптимални условия за формообразуване на резби в материали с различни физикомеханични свойства оценени с твърдостта и микроструктурата на повърхностния слой на резбовата повърхнина.
- Сравнение на максималните стойности на въртящите моменти на три вида метчици (режещи, деформиращи и режещо-деформиращи метчици) при обработване на материали с различни физикомеханични свойства.

Приложимост

В зависимост от съотношение на прибавките за рязане и пластична деформация и физикомеханичните свойства на изследваните материали са получени данни за диаметрите на предварително обработените отвори при формообразуване на резби от М6 до М12 с нова конструкция режещо-деформиращи метчици.

Определени са оптимални комбинации от стойности на диаметъра на предварително обработеният отвор d_0 , ъгъла на наклона на стружковия канал на инструмента λ_s и дължината на резбата L , осигуряващи минимален въртящ момент M_B при формообразуване на резба М8 с нова конструкция режещо-деформиращи метчици в алуминиева сплав, мед, месинг и стомани $C10$ и $C50$.

Апробация на дисертационния труд

Дисертационната работа е докладвана и обсъждана на разширено заседание на катедра “Машиностроителна техника и технологии” при ТУ–Габрово.

Етапи от дисертационната работа са обсъждани и публикувани в:

- Международна научна конференция UNITECH, гр. Габрово, 2021г. и 2022г.;
- Национална конференция по машиностроене и машинознание, гр. Варна, 2023 г.;
- Научна конференция TechCo – Lovech 2024 г.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд съдържа: увод, приети означения и съкращения, 4 глави, заключение, класификация на приносите, списък на публикации по дисертацията, използвана литература и съдържание, в общ обем 152 стр., в които са поместени текст, формули, 82 фигури и графики и 28 таблици. Литературата обхваща 169 заглавия – статии, доклади, книги, учебници, дисертации, справочници и каталози, стандарти и интернет сайтове, от които 117 на латиница.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Глава първа: Формообразуване на резбови повърхнини

Скрепителните резби са едни от най-разпространените елементи на машиностроителните детайли. Известно е, че над 70% от детайлите на съвременните машини, механизми и апарати имат резбови отвори. Голямото многообразие на резбови повърхнини в детайли изработени от различни материали, с различна форма, размери и точност, както и широкото практическо приложение на резбовите съединения са предпоставка за прилагането на различни методи и инструменти за резбообработване.

Обзорът на методите и инструментите за формообразуване на вътрешни резби в различни материали показва, че обработването на скрепителни резби с размери М5 – М12 с метчици е един от най-използваните методи, осигуряващ както добро качество на обработените повърхнини, така и ниска себестойност. Формообразуването се реализира с режещи, деформиращи (валцовачи) и с режещо-деформиращи метчици.

Съществуват голям брой изследвания на работоспособността на режещи и деформиращи метчици при обработка на резби в различни материали които отразяват влиянието на работните условия (скорост на формообразуване и смазочно-охлаждащи течности), както и вида на износоустойчивите покрития. Основните резултати, получени при обработване на резби, са свързани с изследване и моделиране на въртящия момент, силата на рязане, трайността на инструментите и с качеството на обработените повърхнини.

Изследванията обаче на работоспособността на комбинираните режещо-деформиращи метчици са малко на брой и са за конкретен метчик като конструкция и геометрия, както и при обработване на определени материали.

С оглед практическото приложение на режещо-деформиращите метчици е необходимо да се изследва работоспособността им и да се оптимизират работните условия при формообразуване на резби в материали с различни физикомеханични свойства.

Глава втора: Теоретико-експериментално изследване на процеса на формообразуване на резби с режещо-деформиращи метчици

2.1. Геометрични и конструктивни параметри на режещо-деформиращи метчици

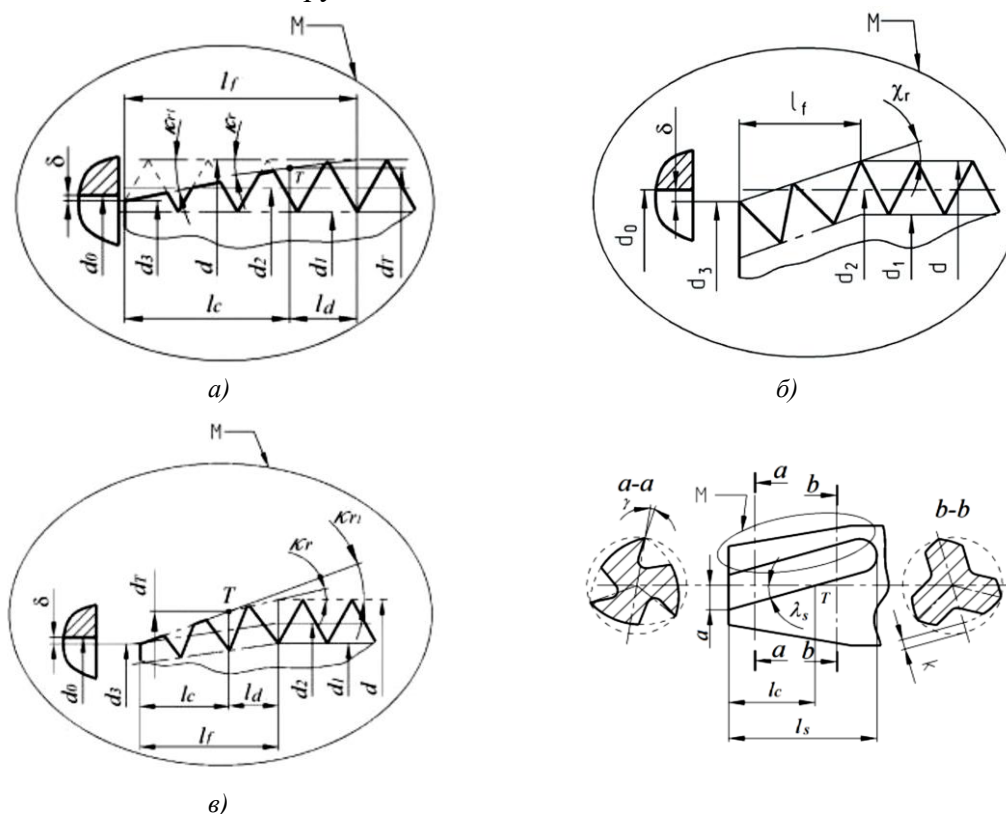
Разработена е нова конструкция режещо-деформиращ метчик, при която прибавката може да бъде изрязвана по генераторна, профилна или комбинирана (фиг.2.1 а), б) и в)) схема. Създадените режещо-деформиращи метчици изрязват прибавката по профилната схема, което осигурява следните предимства:

- снемат се тънки стружки и с двата странични режещи ръба на метчика;
- осигурява се по-добро водене и нарязване на резбата още от първата навивка;
- обезпечават се по-малка грапавост и по-висока точност на обработените повърхнини;
- неточността в стъпката на резбата на метчика се отразява по-малко на точността на нарязваната резба.

Зъбите на метчиците са затиловани, защото в противен случай задният ръб на зъба се оказва при по-голям диаметър от този на вече нарязаната от предния режещ зъб резба, съпротивлението на обработвания материал силно нараства при по-нататъшното движение на метчика и може да предизвика счупването му.

Дължините на режещата и уплътняващата част се определят от мястото на пресичане на наклонения под ъгъл λ_s стружков канал с осовата равнина на метчика (точка T) и от дължината на формообразуващата част l_f . Зъбите, намиращи се преди точката T , са режещи с положителен заден ъгъл, а тези, разположени след тази точка, са деформиращи поради отрицателния си ъгъл. В зависимост от разположението и дължината на

стружковите канали l_s спрямо формообразуващата част и стойността на ъгъла λ_s , метчикът работи като режещ или режещо-деформиращ. Метчикът работи като режещо-деформиращ, когато е с наклонени стружкови канали и формообразуващата му част е с дължина по-голяма или равна на дължината на режещата част и диаметърът d_0 на предварително обработения отвор е в границите $d_2 \geq d_0 \geq d_1$. Ако формообразуващата част на метчика е с по-малка дължина от тази на режещата, тогава метчикът работи като режещ и част от калибровачите зъби също извършват рязане. Формата на напречното сечение на деформиращата част е еднаква с тази на напречното сечение на калибровачата част и е оформена и затилована като на безстружков метчик, което способства за увеличаване якостта на инструмента.



Фиг. 2.1. Конструктивни и геометрични елементи на нова конструкция режещо – деформиращ метчик: а)генераторна схема, б)профилна схема, в) комбинирана

С оглед практическото приложение на създадените режещо-деформиращи метчици за обработване на материали с различни физикомеханични свойства е необходимо да се определи диаметърът на предварително обработения отвор d_0 преди формообразуване на резбата, в зависимост от геометричните и конструктивните параметри на инструмента и прибавката за рязане и за пластична деформация.

2.2. Аналитично определяне на диаметъра на предварително обработения отвор при режещо-деформиращи метчици

Диаметъра на предварително обработения отвор d_0 се определя от зависимостта:

$$d_0 = d + d_1 - d_T \quad [mm], \quad (2.1)$$

където: d – външен диаметър на резбата;

d_1 – вътрешен диаметър на резбата;

d_T – диаметър, определен от местоположението на точка T . Големината на диаметъра d_T зависи от съотношението между прибавката за пластична деформация и прибавката за рязане (η , %), както и от физикомеханичните свойства на обработвания материал.

$$d_T = d - 0,1\sqrt{k \cdot \eta(d - d_2)} \quad [mm], \quad (2.2)$$

където: $k = \frac{E+\rho}{E}$, E , N/m^2 – модул на еластичност, ρ , N/m^2 – налягане, препоръчано от литературни източници: $\rho \approx (7 \div 8)R_e$;

R_e - граница на провлачване;

η – коефициент, отчитащ процентното съотношение между прибавката за пластична деформация и прибавката за рязане;

d_2 – среден диаметър на резбата.

Основните конструктивни и геометрични елементи на използваните режещо-деформиращи метчици са посочени в табл. 2.1.

Табл. 2.1. Геометричните и конструктивни параметри на изследваните режещо-деформиращи метчици

Резба, mm	η , %	λ_s , deg	d , mm	d_{1max} , mm	d_2 , mm	χ_{r1}	χ_r	l_c , mm	l_d , mm	l_f , mm
M6	17,5	3°	6,11	4,868	5,409	2,06°	2°	9,7	4,4	14,1
		6°				4,15°		4,9	4,4	9,3
		9°				6,22°		3,2	4,4	7,6
	25	3°				1,37°	1°	9,4	11,8	21,2
		6°				2,77°		4,7	11,8	16,5
		9°				4,15°		3,1	11,8	14,9
	32,5	3°				1,17°	1°	7,3	14,6	21,9
		6°				1,97°		4,4	14,6	19,0
		9°				3,62°		2,4	14,6	17,0
		3°				2,27°	2°	11,3	4,4	15,7
		6°				4,57°		5,7	4,4	10,1
		9°				6,84°		3,8	4,4	8,2
M8	17,5	3°	8,11	6,577	7,251	1,51°	1,5°	13,3	7,9	21,2
		6°				3,08°		6,5	7,9	14,4
		9°				5,29°		3,8	7,9	11,7
	25	3°				1,24°	1°	11,5	14,6	26,1
		6°				2,52°		5,7	14,6	20,3
		9°				3,76°		3,8	14,6	18,4
	32,5	3°				2,28°	2°	11,3	4,4	15,7
		6°				4,59°		5,6	4,4	10,0
		9°				6,88°		3,7	4,4	8,1
M9	17,5	3°	9,11	7,577	8,251	1,53°	1,5°	15,0	11,7	26,7
		6°				3,09°		7,4	11,7	19,1
		9°				4,64°		4,9	11,7	16,6
	25	3°				1,28°	1°	13,4	14,6	28,0
		6°				2,59°		6,6	14,6	21,2
		9°				3,81°		4,5	14,6	19,1
	32,5	3°				2,35°	2°	14,6	4,9	19,5
		6°				4,69°		7,3	4,9	12,2
		9°				7,07°		4,8	4,9	9,7
M10	17,5	3°	10,14	8,286	9,096	1,91°	1,5°	14,9	8,5	23,4
		6°				3,86°		7,4	8,5	15,9
		9°				5,77°		4,9	8,5	13,4
	25	3°				1,50°	1°	15,3	15,5	30,8
		6°				3,03°		7,5	15,5	23,0
		9°				4,55°		5,0	15,5	20,5
	32,5	3°				2,36°	2°	15,8	6,6	22,4
		6°				4,77°		7,8	6,6	14,4
		9°				7,18°		5,2	6,6	11,8
M12	17,5	3°	12,16	10,006	10,943	2,06°	2°	15,7	8,0	23,7
		6°				4,07°		7,7	8,0	15,7
		9°				6,11°		5,1	8,0	13,1
	25	3°				1,68°	1,5°	15,4	12,7	28,1
		6°				3,38°		7,6	12,7	20,3
		9°				5,08°		5,1	12,7	17,8
	32,5	3°								
		6°								
		9°								
		3°								
		6°								
		9°								

Аналитично определени са диаметрите на предварително обработените отвори при използване на режещо-деформиращи метчици M6, M8, M9, M10 и M12 за обработка на резби в пет материала с различни физикомеханични свойства (цветни метали и сплави – алуминиева сплав *Al 2024T3*, мед *Cu 99,9%* и месинг *CuZn39Pb3*, и ниско- и средновъглеродни стомани *C10* и *C50* - табл. 2.2), като е взето предвид влиянието на коефициента η , отчитащ процентното съотношение между прибавката за пластична деформация и прибавката за рязане.

Табл. 2.2. Пресметнат диаметър d_T и диаметър d_0

Коефициент η , %	Материал	M6		M8		M9		M10		M12	
		d_T ,mm	d_0 ,mm	d_T ,mm	d_0 ,mm	d_T ,mm	d_0 ,mm	d_T ,mm	d_0 ,mm	d_T ,mm	d_0 ,mm
17,5	Al2024T3	5,828	5,148	7,763	6,972	8,763	7,972	9,759	8,707	11,671	10,495
	Cu99,9	5,832	5,146	7,768	6,964	8,769	7,965	9,766	8,699	11,679	10,487
	CuZn39Pb3	5,833	5,145	7,769	6,964	8,769	7,965	9,766	8,699	11,679	10,487
	C10	5,833	5,145	7,769	6,964	8,769	7,965	9,766	8,699	11,679	10,487
	C50	5,833	5,145	7,769	6,964	8,769	7,965	9,766	8,699	11,679	10,487
25	Al2024T3	5,683	5,295	7,677	7,050	8,677	8,050	9,679	8,807	11,597	10,569
	Cu99,9	5,689	5,289	7,684	7,043	8,684	8,043	9,687	8,799	11,606	10,561
	CuZn39Pb3	5,689	5,289	7,684	7,043	8,684	8,043	9,687	8,799	11,606	10,561
	C10	5,689	5,289	7,684	7,043	8,684	8,043	9,687	8,799	11,606	10,561
	C50	5,689	5,289	7,684	7,043	8,684	8,043	9,687	8,799	11,606	10,561
32,5	Al2024T3	5,623	5,355	7,571	7,116	8,571	8,116	9,576	8,880	11,519	10,647
	Cu99,9	5,630	5,348	7,579	7,108	8,579	8,108	9,595	8,871	11,528	10,638
	CuZn39Pb3	5,630	5,348	7,579	7,108	8,579	8,108	9,595	8,871	11,528	10,638
	C10	5,630	5,348	7,579	7,108	8,579	8,108	9,595	8,871	11,528	10,638
	C50	5,630	5,348	7,579	7,108	8,579	8,108	9,595	8,871	11,528	10,638

Получените резултати от изчисленията показват, че физикомеханичните свойства на изследваните материали не оказват съществено влияние върху диаметъра на предварително обработения отвор, а определящо е влиянието на съотношението между прибавката за пластична деформация и прибавката за рязане. При различни зададени стойности на коефициента η се наблюдава разлика в диаметрите на предварително обработения отвор в границите на $0,1 \div 0,3 \text{ mm}$.

2.3. Експериментални изследвания на въртящият момент M_B при формообразуване на резби с режещо-деформиращи метчици

2.3.1. Условия на експерименталните изследвания

2.3.1.1. Материали и заготовки

За провеждането на експериментите са използвани и сравнявани опитни образци от следните материали:

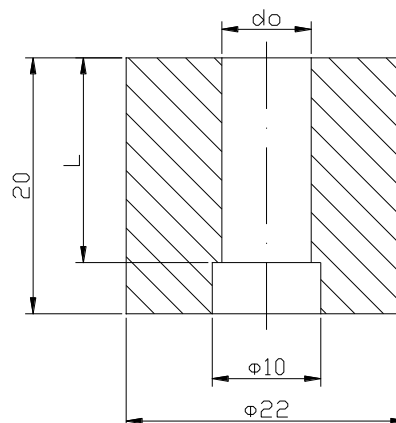
- алуминиева сплав *Al2024T3*;
- мед *Cu 99,9%*;
- месинг *CuZn39Pb3*;
- стомана *C10*;
- стомана *C50*.

Част от основните физикомеханични характеристики и химичният състав на изследваните материали са посочени в табл.2.3.

Табл. 2.3. Физикомеханични свойства и химичен състав на обработваните материали

Обработван материал	Модул на еластичност E , N/m ²	Граница на провлачване R_e , N/m ²	Налягане ρ , N/m ²	Якост на опън σ_B , МПа	Твърдост HV	Химичен състав, %
Al2024T3	$710 \cdot 10^8$	$3,95 \cdot 10^8$	$31,6 \cdot 10^8$	460	135	Al 92.7, Cr <0.1, Cu 3.4, Mg 1.5, Mn 0.6, Si <0.5
Cu99,9%	$1050 \cdot 10^8$	$1,5 \cdot 10^8$	$12 \cdot 10^8$	520	178	P 0.05-0.07
CuZn39Pb3	$1150 \cdot 10^8$	$1,2 \cdot 10^8$	$9,6 \cdot 10^8$	430	145	Al 0.05, Cu 58, Ni 0.2, Pb 3, Sn 0.2
C10	$2060 \cdot 10^8$	$2,6 \cdot 10^8$	$20,8 \cdot 10^8$	335	143	C 0.07, Si 0.17, Mn 0.35, Ni <0.25, Cr <0.15, S <0.04
C50	$2100 \cdot 10^8$	$2,1 \cdot 10^8$	$16,8 \cdot 10^8$	630	279	C 0.5, Si 0.103, Mn 0.8, Ni <0.25, Cr 0.11, S 0.03

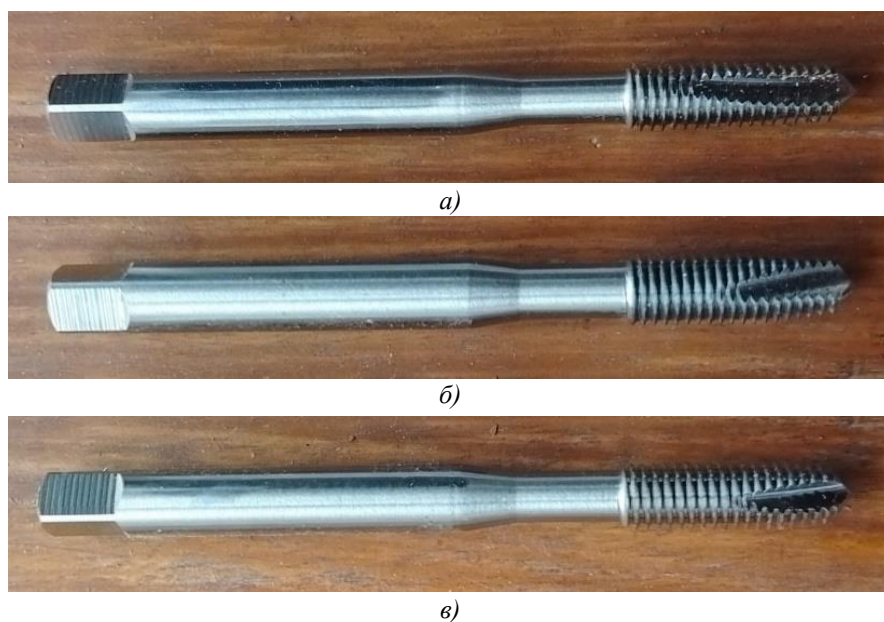
Всички образци са тип „втулка“ с външен диаметър $\phi 22$ mm, дължина 20 mm и $L = 10$ mm, 16 mm и 20 mm (фиг.2.2). Номиналният диаметър на отвора d_o е определен в съответствие с методиката от Глава 2.2 и зависи от съотношението между прибавката за пластична деформация и прибавката за рязане- η ,%, както и от геометричните и конструктивните елементи на изследваните режещо-деформиращи метчици (дължини на режещата l_c и деформиращата част l_d).



Фиг. 2.2. Опитни образци

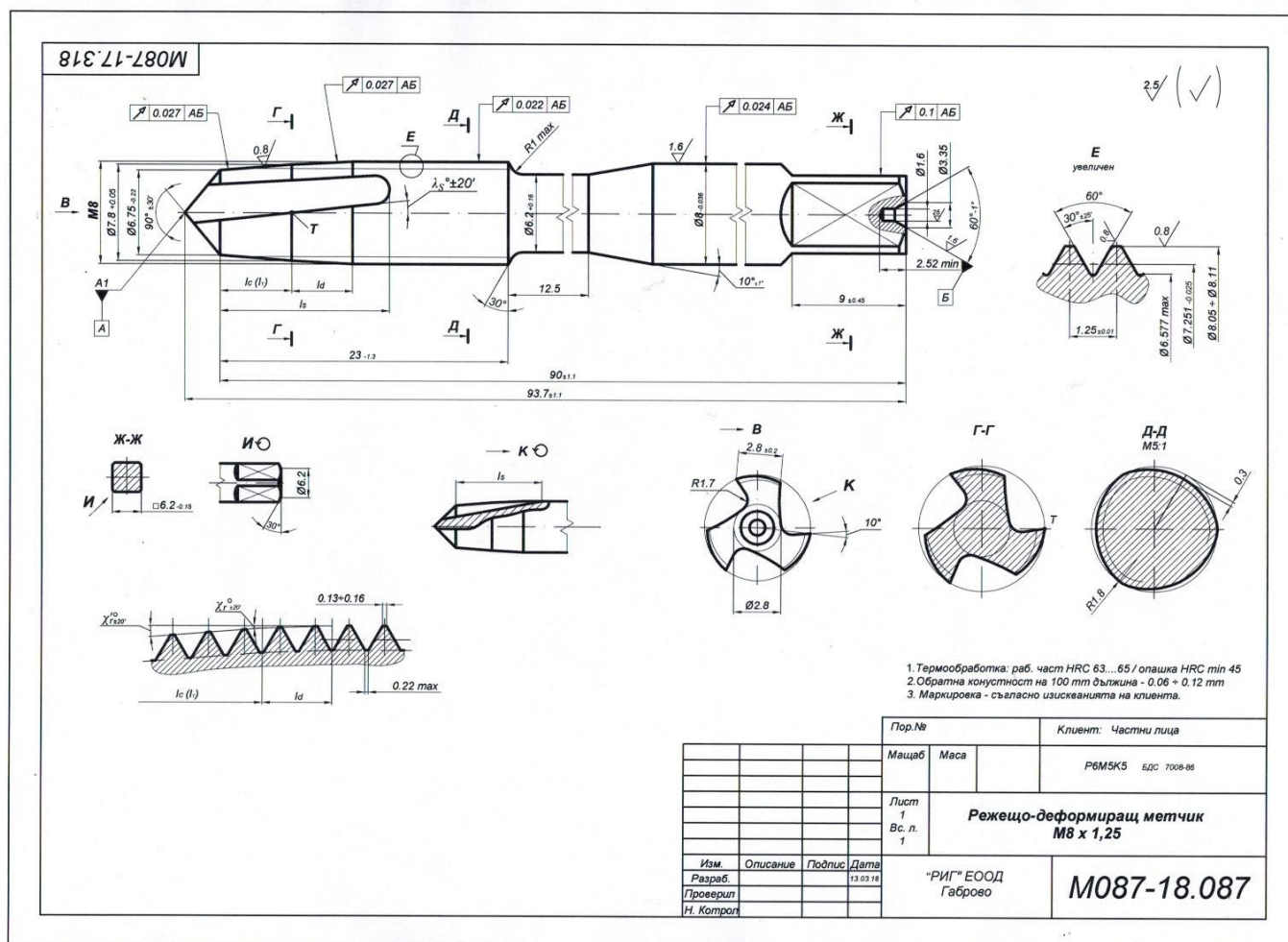
2.3.1.2. Изследвани инструменти

Изследвани са опитни образци на нова оригинална конструкция режещо-деформиращи метчици M8x1,25 (фиг. 2.4), разработени от екип на катедра МТТ в Технически университет–Габрово и изработени в завод „Резбонарезни инструменти Габрово ЕООД“ гр. Габрово.



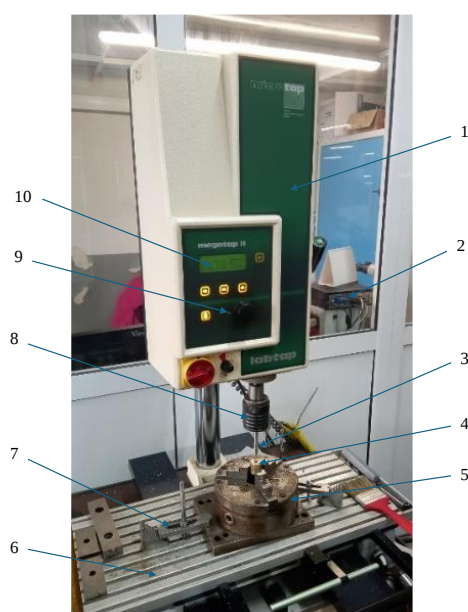
Фиг. 2.4. Режещо-деформиращи метчици с наклон на стружковия канал $\lambda_s=3^\circ$ (а), $\lambda_s=6^\circ$ (б) и $\lambda_s=9^\circ$ (в)

Геометричните и конструктивни елементи на изследваните метчици са определени при съотношение на прибавките за рязане и за пластична деформация $\eta=17,5\%$ (фиг.2.5 и табл. 2.1).



Фиг. 2.5. Основни размери и геометрични параметри на режещо-деформиращ метчик

2.3.1.3. Динамометрична уредба



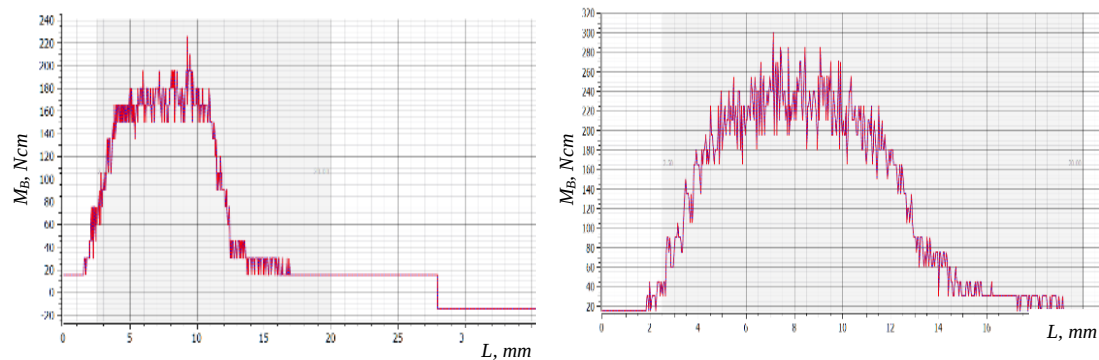
Фиг. 2.6. Специализиран стенд MICROTAP

За определяне на големината на въртящия момент M_B е използван специализиран стенд MICROTAP (фиг. 2.6), които дава възможност за компютърна обработка на резултатите от измерването.

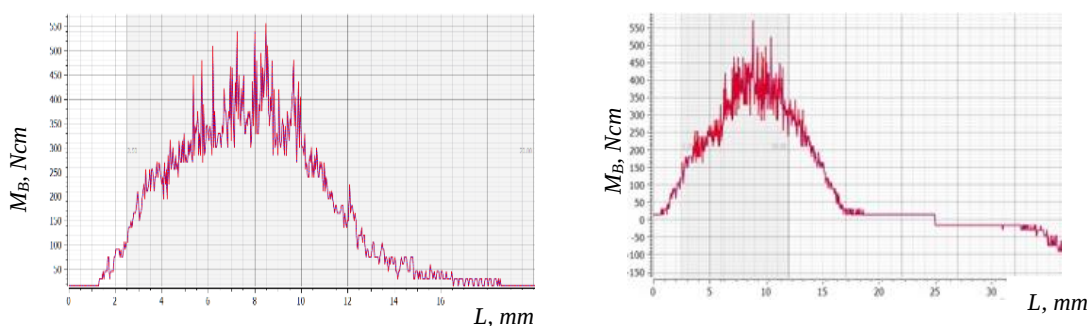
Динамометърът (1) е с диапазон на измерване 0–3000 Ncm. При провеждане на експеримента заготовката (4) се установява в универсален тричелюстен патронник (5), който е монтиран неподвижно върху масата (6) на динамометъра посредством закрепващи планки (7). Изследваният метчик (3) е закрепен към динамометъра чрез резбонарезен патронник (8) с радиална и аксиална компенсация. Настройките на динамометъра се извършват от компютъра (2) и от пулта за управление (9), а резултатите се визуализират на дисплея (10) и монитора на компютъра.

2.3.2. Експериментални резултати

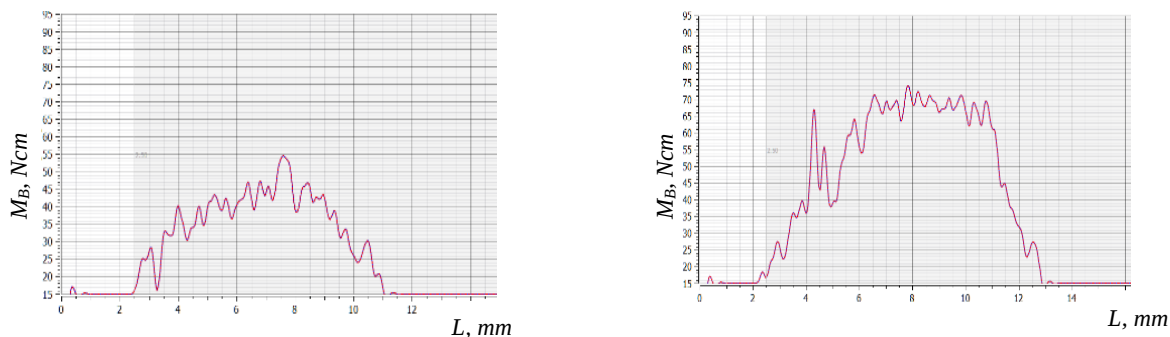
Графичните зависимости и резултатите от проведените изследвания на влиянието на скоростта на формообразуване V_c , диаметъра на предварително обработеният отвор d_0 , ъгъла на наклона на стружковия канал на метчика λ_s и дължината на резбата L са представени последователно от фиг. 2.7. до фиг. 2.26.



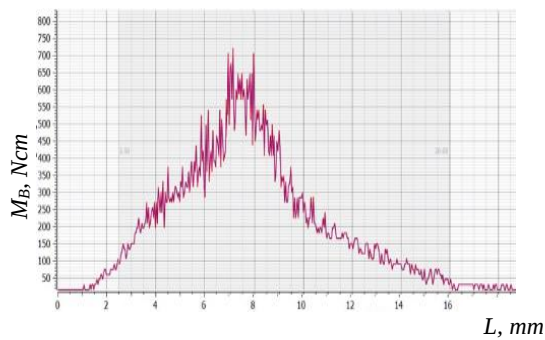
Фиг. 2.7. Изменение на въртящия момент M_B при обработване на алуминиева сплав Al 2024T3 при $V_c \approx 6,3$ m/min (а) и при $V_c \approx 7,9$ m/min (б) ($d_0=7,3$ mm, $\lambda_s=3^\circ$ и $L=10$ mm)



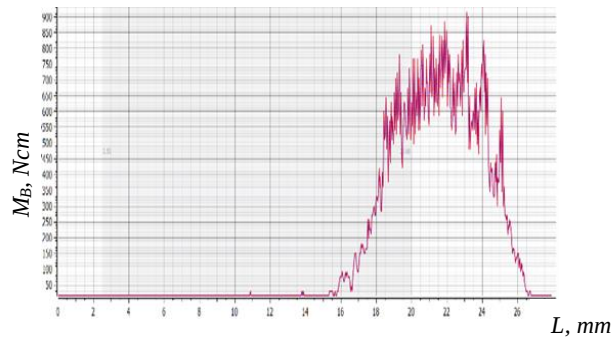
Фиг. 2.8. Изменение на въртящия момент M_B при обработване на мед Cu99,9% при $V_c \approx 6,3$ m/min (а) и при $V_c \approx 7,9$ m/min (б) ($d_0=7,3$ mm, $\lambda_s=3^\circ$ и $L=10$ mm)



Фиг. 2.9. Изменение на въртящия момент M_B при обработване на месинг CuZn39Pb3 при $V_c \approx 6,3$ m/min (а) и при $V_c \approx 7,9$ m/min (б) ($d_0=7,3$ mm, $\lambda_s=3^\circ$ и $L=10$ mm)

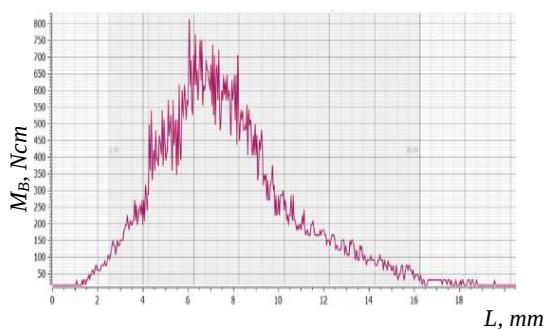


а)

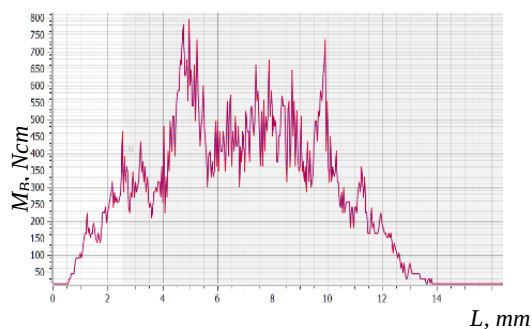


б)

Фиг. 2.10. Изменение на въртящия момент M_B при обработване на стомана C10 при $V_c \approx 6,3$ m/min (а) и при $V_c \approx 7,9$ m/min (б) ($d_0 = 7,3$ mm, $\lambda_s = 3^\circ$ и $L = 10$ mm)

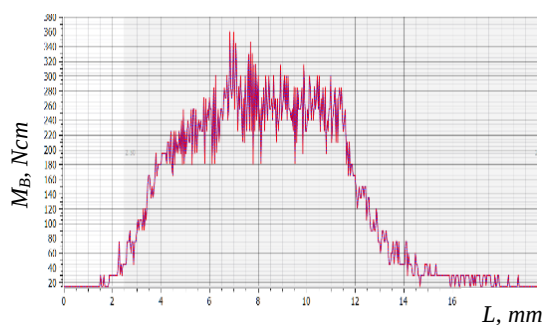


а)

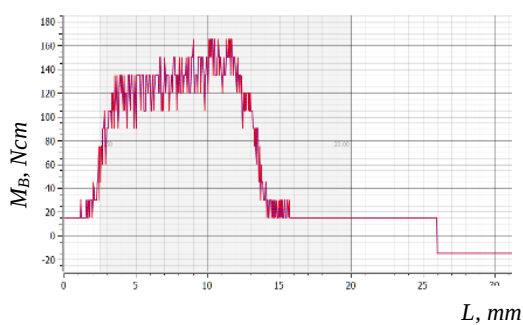


б)

Фиг. 2.11. Изменение на въртящия момент M_B при обработване на стомана C50 при $V_c \approx 6,3$ m/min (а) и при $V_c \approx 7,9$ m/min (б) ($d_0 = 7,3$ mm, $\lambda_s = 3^\circ$ и $L = 10$ mm)

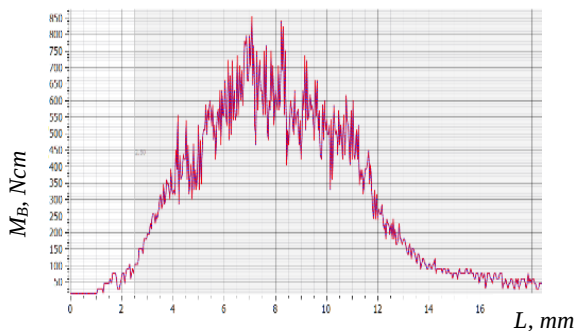


а)

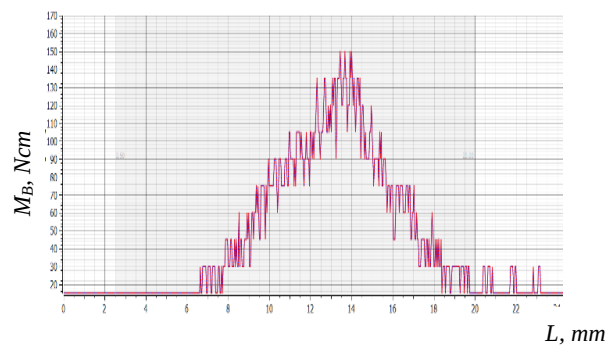


б)

Фиг. 2.12. Изменение на въртящия момент M_B при обработване на алуминиева сплав Al 2024T3 при $d_0 = 7,0$ mm (а) и при $d_0 = 7,3$ mm (б) ($V_c \approx 6,3$ m/min, $\lambda_s = 9^\circ$ и $L = 10$ mm)

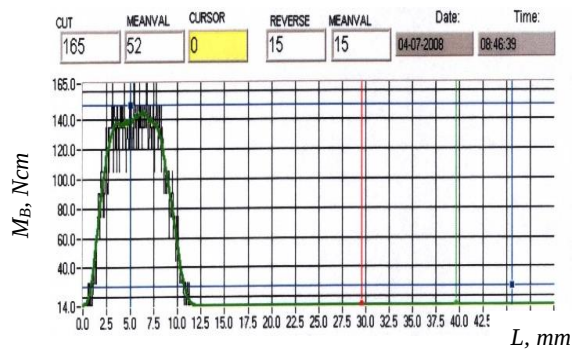


а)

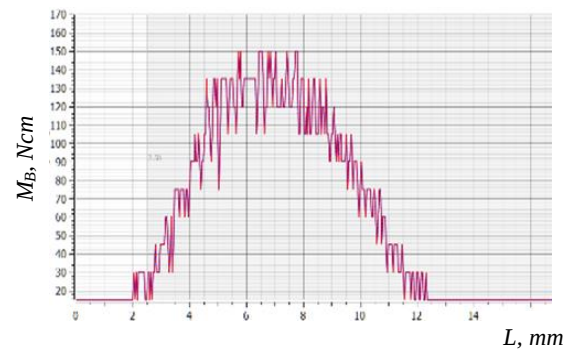


б)

Фиг. 2.13. Изменение на въртящия момент M_B при обработване на мед Cu 99,9% при $d_0 = 7,0$ mm (а) и при $d_0 = 7,3$ mm (б) ($V_c \approx 6,3$ m/min, $\lambda_s = 9^\circ$ и $L = 10$ mm)

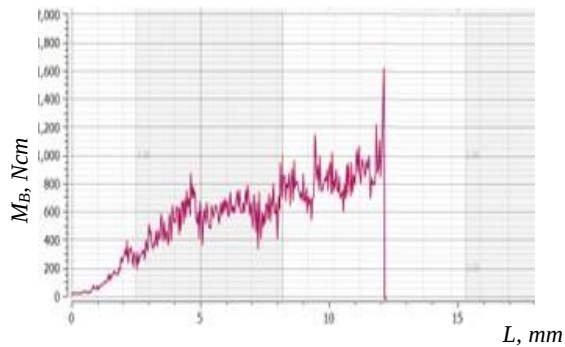


a)

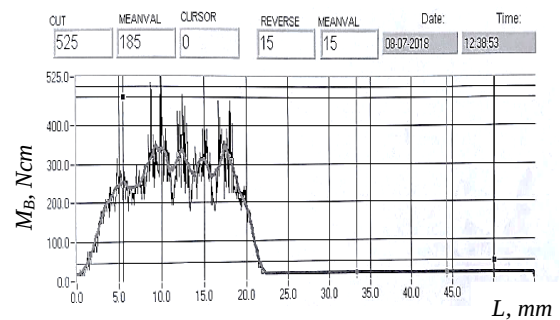


б)

Фиг. 2.14. Изменение на въртящия момент M_B при обработване на месинг CuZn39Pb3 при $d_0=7,0$ mm (a) и при $d_0=7,3$ mm (б) ($V_c \approx 6,3$ m/min, $\lambda_s = 9^\circ$ и $L=10$ mm)

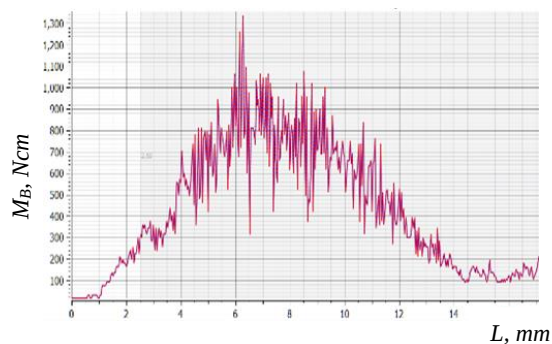


a)

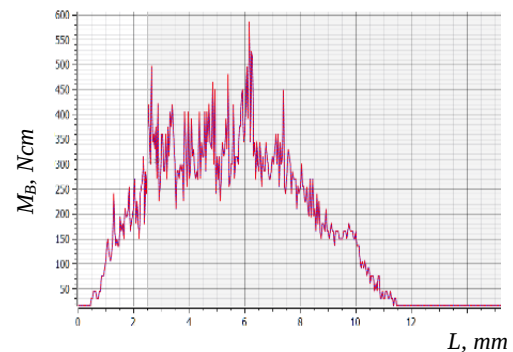


б)

Фиг. 2.15. Изменение на въртящия момент M_B при обработване на стомана C10 при $d_0=7,0$ mm (a) и при $d_0=7,3$ mm (б) ($V_c \approx 6,3$ m/min, $\lambda_s = 9^\circ$ и $L=10$ mm)

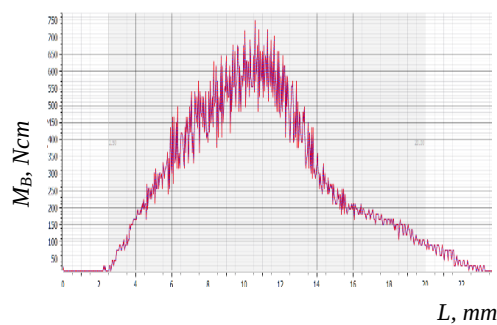


a)

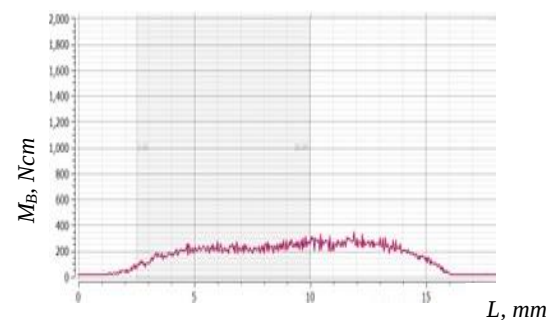


б)

Фиг. 2.16. Изменение на въртящия момент M_B при обработване на стомана C50 при $d_0=7,0$ mm (a) и при $d_0=7,3$ mm (б) ($V_c \approx 6,3$ m/min, $\lambda_s = 9^\circ$ и $L=10$ mm)

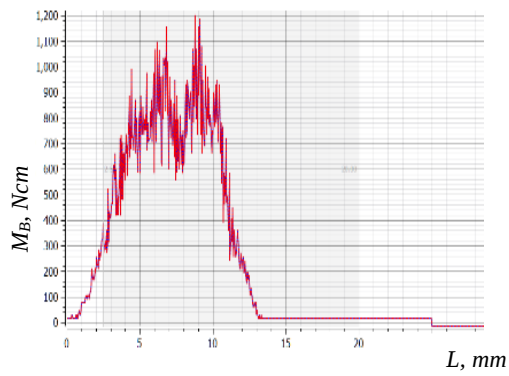


a)

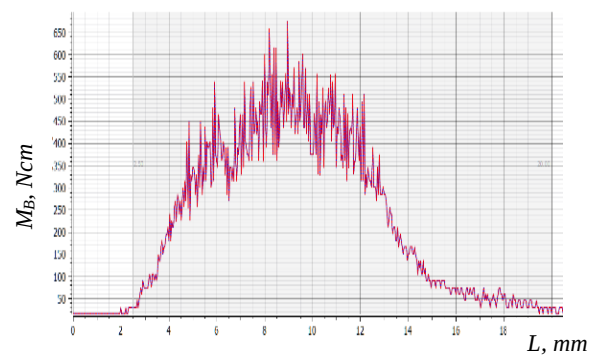


б)

Фиг. 2.17. Изменение на въртящия момент M_B при обработване на алуминиева сплав Al 2024T3 при $\lambda_s = 6^\circ$ (a) и $\lambda_s = 9^\circ$ (б) ($V_c \approx 6,3$ m/min, $d_0=7,1$ mm и $L=16$ mm)

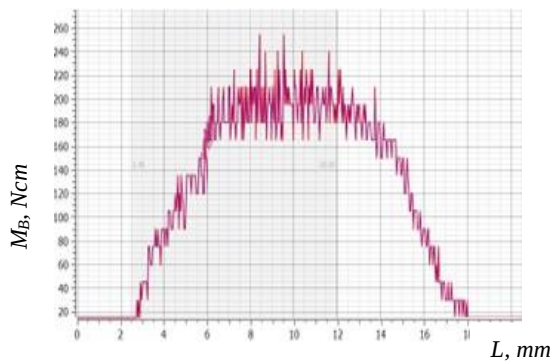


a)

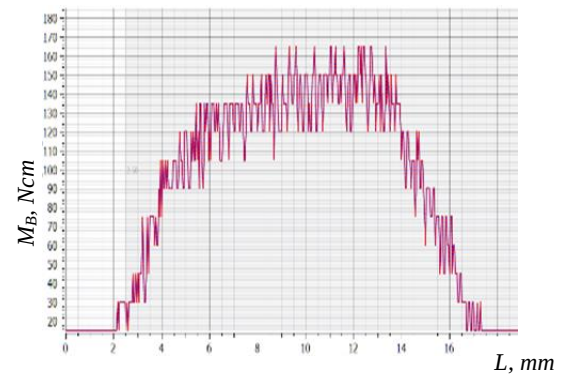


б)

Фиг. 2.18. Изменение на въртящия момент M_B при обработване на мед Cu 99,9% при $\lambda_s = 6^\circ$ (a) и $\lambda_s = 9^\circ$ (б) ($V_c \approx 6,3$ m/min, $d_0 = 7,1$ mm и $L = 16$ mm)

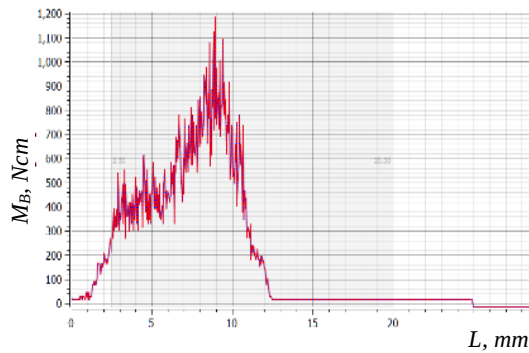


a)

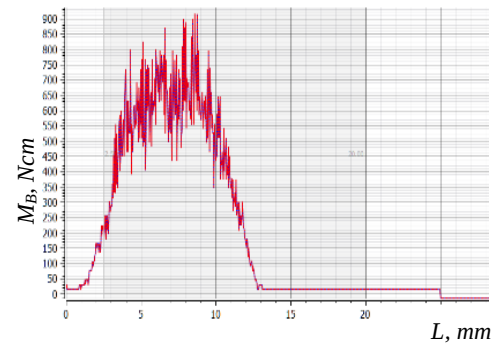


б)

Фиг. 2.19. Изменение на въртящия момент M_B при обработване на месинг CuZn39Pb3 при $\lambda_s = 6^\circ$ (a) и $\lambda_s = 9^\circ$ (б) ($V_c \approx 6,3$ m/min, $d_0 = 7,1$ mm и $L = 16$ mm)

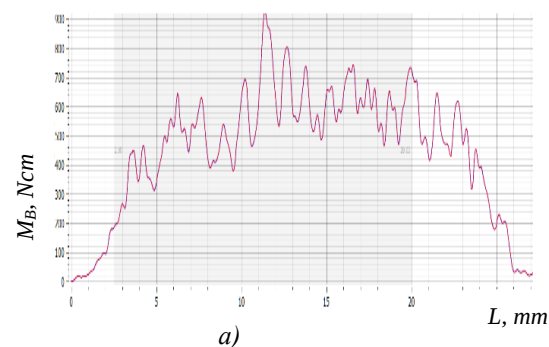


a)

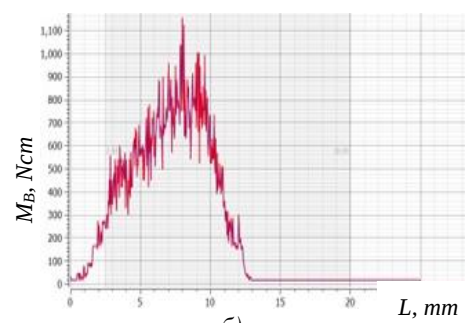


б)

Фиг. 2.20. Изменение на въртящия момент M_B при обработване на стомана C10 при $\lambda_s = 6^\circ$ (a) и $\lambda_s = 9^\circ$ (б) ($V_c \approx 6,3$ m/min, $d_0 = 7,1$ mm и $L = 16$ mm)

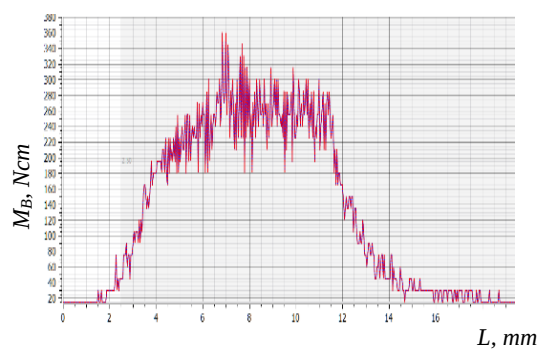


a)

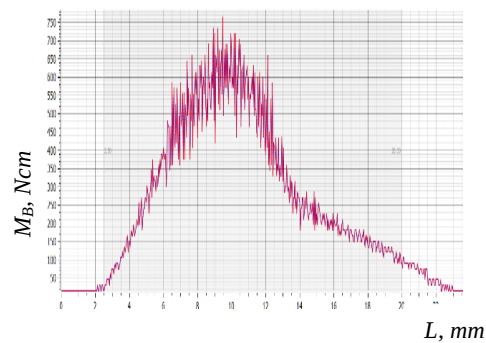


б)

Фиг. 2.21. Изменение на въртящия момент M_B при обработване на стомана C50 при $\lambda_s = 6^\circ$ (a) и $\lambda_s = 9^\circ$ (б) ($V_c \approx 6,3$ m/min, $d_0 = 7,1$ mm и $L = 16$ mm)

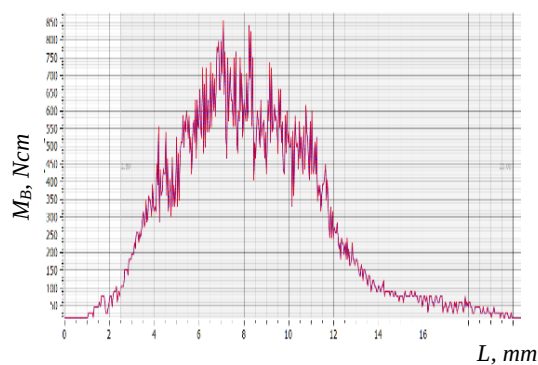


a)

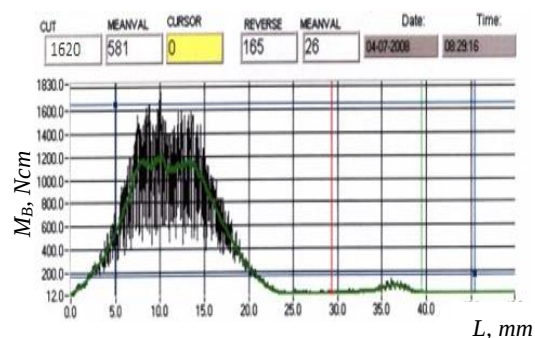


б)

Фиг. 2.22. Изменение на въртящия момент M_B при обработване на алуминиева сплав Al 2024T3 при $L = 10$ mm (a) и $L = 22$ mm (б) ($V_c \approx 6,3$ m/min, $d_0 = 7,0$ mm и $\lambda_s = 9^\circ$)

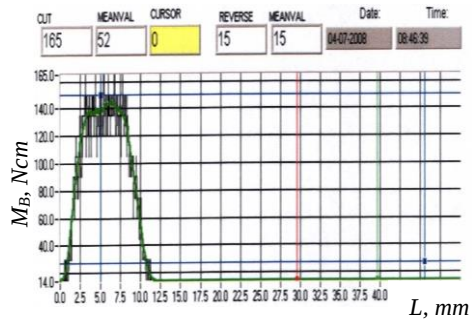


a)

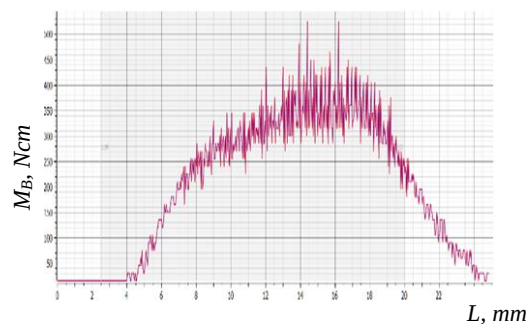


б)

Фиг. 2.23. Изменение на въртящия момент M_B при обработване на мед Cu 99,9% при $L = 10$ mm (a) и $L = 22$ mm (б) ($V_c \approx 6,3$ m/min, $d_0 = 7,0$ mm и $\lambda_s = 9^\circ$)

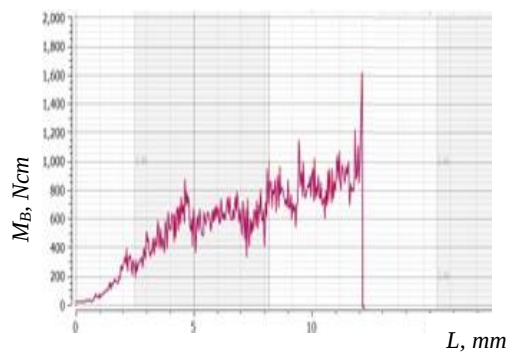


a)

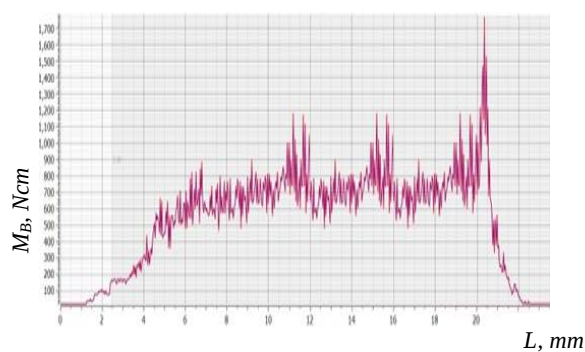


б)

Фиг. 2.24. Изменение на въртящия момент M_B при обработване на месинг CuZn39Pb3 при $L = 10$ mm (a) и $L = 22$ mm (б) ($V_c \approx 6,3$ m/min, $d_0 = 7,0$ mm и $\lambda_s = 9^\circ$)

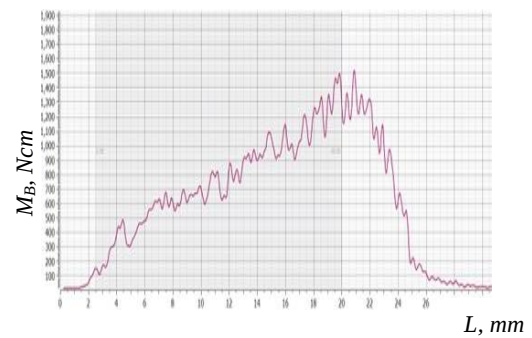
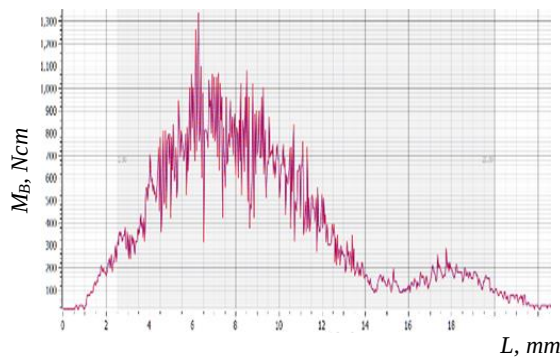


a)



б)

Фиг. 2.25. Изменение на въртящия момент M_B при обработване на стомана C10 при $L = 10$ mm (a) и $L = 22$ mm (б) ($V_c \approx 6,3$ m/min, $d_0 = 7,0$ mm и $\lambda_s = 9^\circ$)



а)

б)

Фиг. 2.26. Изменение на въртящия момент M_B при обработване на стомана C50 при $L = 10$ mm (а) и $L = 22$ mm (б) ($V_c \approx 6,3$ m/min, $d_0 = 7,0$ mm и $\lambda_s = 9^\circ$)

Табл. 2.4 Резултати от експеримента за определяне на влиянието на скоростта на формообразуване V_c върху въртящия момент M_B при обработката на цветни метали и сплави и ниско- и средновъглеродни стомани

V_c , [m/min]	d_0 , [mm]	λ_s , [deg]	L , [mm]	M_{Bmax} , Ncm				
				Al 2024T3	Cu 99,9%	CuZn39Pb3	C10	C50
6,3	7,3	3	10	262,5	577,5	67,5	795	795
7,9				277,5	580	70	805	807,5

Табл.2.6 Резултати от експеримента за определяне на влиянието на предварително обработения отвор d_0 върху въртящия момент M_B при обработката на цветни метали и сплави и ниско- и средновъглеродни стомани

d_0 , [mm]	λ_s , [deg]	L , [mm]	V_c , [m/min]	M_{Bmax} , Ncm				
				Al 2024T3	Cu 99,9%	CuZn39Pb3	C10	C50
7,0	9	10	6,3	352,5	892,5	157,5	927,5	1297,5
7,1				282,5	707,5	162,5	922,5	1117,5
7,2				207,5	505	137,5	785	942,5
7,3				195	210	145	495	690

Табл. 2.8 Резултати от експеримента за определяне на влиянието на ъгъла на наклона на стружковия канал на инструмента λ_s върху въртящия момент M_B при обработката на цветни метали и сплави и ниско- и средновъглеродни стомани

λ_s , [deg]	d_0 , [mm]	L , [mm]	V_c , [m/min]	M_{Bmax} , Ncm				
				Al 2024T3	Cu 99,9%	CuZn39Pb3	C10	C50
3	7,1	16	6,3	610	1672,5	292,5	1357,5	1492,5
6				615	1177,5	210	1222,5	1215
9				345	832,5	157,5	862,5	1135

Табл. 2.10 Резултати от експеримента за определяне на влиянието на дължината на резбата L върху въртящия момент M_B при обработката на цветни метали и сплави и ниско- и средновъглеродни стомани

L , [mm]	d_0 , [mm]	λ_s , [deg]	V_c , [m/min]	M_{Bmax}, Ncm				
				Al 2024T3	Cu 99,9%	CuZn39Pb3	C10	C50
10	7,0	9	6,3	352,5	892,5	157,5	927,5	1297,5
16				452,5	1272,5	302,5	1407,5	1367,5
22				930	1597,5	532,5	1777,5	1530

Анализът на получените резултати показва, че:

- Скоростта на формообразуване V_c оказва незначително влияние върху максималния въртящ момент M_{Bmax} като определените стойности на M_{Bmax} се различават от 0,43% до 5,4% при различните обработвани материали. Това дава основание факторът скорост на формообразуване V_c да не бъде включван в планиран многофакторен експеримент.
- С увеличаване на диаметъра на предварително обработения отвор d_0 максималният въртящ момент M_{Bmax} намалява, което е по-силно изразено при обработката на ниско- и средно въглеродни стомани.
- С нарастване на ъгъла на наклона на стружковия канал на метчика λ_s максималният въртящ момент M_{Bmax} намалява, което е най-силно изразено при обработката на мед Cu 99,9% и най-слабо – при обработката на месинг $CuZn39Pb3$.
- С увеличаване на дължина на резбата L максималният въртящ момент M_{Bmax} нараства, което е по-силно изразено при обработката на алуминиевата сплав Al 2024T3 и мед Cu 99,9% и по-слабо – при обработката на месинг $CuZn39Pb3$ и на двата вида стомани.

Получените резултати от проведеното теоретично и експериментално изследване дават основание в качеството на управляващи фактори на процеса да се изберат диаметърът на предварително обработения отвор d_0 , ъгълът наклон на стружковия канал на инструмента λ_s и дължината на резбата L .

Глава трета: Моделиране и анализ на работоспособността на режещо-деформиращи метчици

3.1. Методика на планирания експеримент при режещо-деформиращи метчици

По метода на статистическото планиране е проведен многофакторен експеримент по оптимален централно-композиционен план от вида $N=2^3+2.3+1$, за създаването на модел на влиянието на диаметъра на предварително обработения отвор d_0 , ъгъла на наклон на стружковия канал на инструмента λ_s и дължината на резбата L върху различни използвани материали. Броят на наблюденията във всеки опит е 2. Матрицата на плана е представена в табл. 3.1.

Общият вид на търсения модел е:

$$Y_j = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i x_i + \sum_{i < j}^3 b_{ij} x_{ij} + \sum_{i=1}^3 b_{ii} x_i^2, \quad (3.1),$$

където Y_j е максималният въртящ момент M_{Bmaxj} , измерен при обработване на изследваните материали, както следва:

$Y_1 = M_{Bmax1}$ – за алуминиева сплав $Al2024T3$;
 $Y_2 = M_{Bmax2}$ – за мед Cu 99,9%;
 $Y_3 = M_{Bmax3}$ – за месинг $CuZn39Pb3$;
 $Y_4 = M_{Bmax4}$ – за стомана $C10$;
 $Y_5 = M_{Bmax5}$ – за стомана $C50$;

b_0 , b_i и b_{ij} са регресионни коефициенти;

x_i – управляващи фактори в кодиран вид (x_1 , x_2 и x_3).

Регресионният анализ, респективно синтезът на полиномите (Y_j) са реализирани посредством програмен продукт QstatLab. Методиката включва:

- Определяне на регресионните коефициенти;
- Проверка за значимост на регресионните коефициенти по t – критерия на Стюдънт;
- Проверка на адекватност на модела чрез множествения коефициент на корелация по критерия на Фишер;
- Преминване от кодиран x_i към натурален вид $\tilde{x}_i$ на факторите, като връзката помежду им се изразява със следната зависимост:

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - \tilde{x}_{i0}}{\varphi_i}, \quad (3.6)$$

$$\varphi_i = \frac{(\tilde{x}_{gi} - \tilde{x}_{di})}{2}. \quad (3.7)$$

където $\tilde{x}_{i0}$ е основно ниво на i -я фактор, φ_i – интервал на вариране на i -я фактор, а $\tilde{x}_{gi}$ и $\tilde{x}_{di}$ са съответно горно и долно ниво на i -я фактор. Натуралните стойности, които съответстват на кодираните, са:

$\tilde{x}_1 = d_0, mm$ – диаметър на предварително обработения отвор;

$\tilde{x}_2 = \lambda_s, deg$ – ъгъла на наклона на стружковия канал;

$\tilde{x}_3 = L, mm$ – дължина на резбата.

- Построяване на графични зависимости.

Нивата на изменение на управляващите фактори са представени в табл. 3.2. Те са определени въз основа на проведеното теоретично и експериментално изследване (Глава 2.2 и Глава 2.3) и гарантират работоспособността на изследваните метчици.

Табл. 3.2 Нива на изменение на факторите

Наименование на управляващите фактори	Нива на факторите в кодиран вид		
	-1 (долно)	0 (основно)	+1 (горно)
	Натурални стойности на факторите		
d_0, mm – диаметър на предварително обработения отвор	7,0	7,15	7,3
λ_s, deg – ъгъла на наклона на стружковия канал	3	6	9
L, mm – дължина на резбата	10	16	22

Табл. 3.1 Матрица на плана

№	x_1	x_2	x_3
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1
9	-1	0	0
10	+1	0	0
11	0	-1	0
12	0	+1	0
13	0	0	-1
14	0	0	+1
15	0	0	0

3.2. Моделиране и анализ на максималния въртящ момент M_{Bmax} при обработване на цветни метали и сплави и ниско- и средновъглеродни стомани

Проведени са многофакторни експерименти съгласно методиката, представена в Глава 3.1, като планът на експеримента със средноаритметичните стойности на максималния въртящ момент за всеки от опитите (M_{Bmaxj_m}) при обработване на цветни метали и сплави и ниско- и средновъглеродни стомани са представени в таблицата.

План на експеримента с експериментално определени средни стойности на максималния въртящ момент при формообразуване на резби в цветни метали и сплави и ниско- и средновъглеродни стомани

№	Фактори			Измерен параметър $Y_j = M_{Bmaxj}$, Ncm				
	d_0 [mm]	λ_s [deg]	L [mm]	$Y_1 = M_{Bmax1}$	$Y_2 = M_{Bmax2}$	$Y_3 = M_{Bmax3}$	$Y_4 = M_{Bmax4}$	$Y_5 = M_{Bmax5}$
				M_{Bmax1_m}	M_{Bmax2_m}	M_{Bmax3_m}	M_{Bmax4_m}	M_{Bmax5_m}
1	7,0	3	10	557,5	1052,5	135	1657,5	1507,5
2	7,3	3	10	262,5	577,5	67,5	795	795
3	7,0	9	10	352,5	892,5	157,5	927,5	1297,5
4	7,3	9	10	195	210	145	495	690
5	7,0	3	22	1045	1800	997,5	1905	1917,5
6	7,3	3	22	555	960	487,5	1247,5	1440
7	7,0	9	22	930	1597,5	532,5	1777,5	1530
8	7,3	9	22	547,5	810	240	997,5	1347,5
9	7,0	6	16	840	1417,5	310	1425	1582,5
10	7,3	6	16	277,5	742,5	277	990	1050
11	7,15	3	16	610	1672,5	420	1357,5	1492,5
12	7,15	9	16	345	1085	165	862,5	1135
13	7,15	6	10	195	1080	72,5	1120	1035
14	7,15	6	22	780	1517,5	735	1747,5	1590
15	7,15	6	16	465	1177,5	210	1222,5	1470

Чрез прилагане на методиката за регресионния анализ и на програмния продукт QstatLab са построени теоретико-експериментални модели за максималния въртящ момент M_{Bmax} , отразяващи комплексното влияние на управляващите фактори (d_0 , λ_s и L), както следва:

- При обработване на резби в алуминиева сплав $Al2024T3$:

$$M_{Bmax1} = 177843,35 - 49421,67d_0 - 22\lambda_s + 455,33L + 3433,33d_0^2 - 58,33d_0L \quad (3.9)$$

- При обработване на резби в мед $Cu\ 99,9\%$:

$$M_{Bmax2} = -612764,63 + 173833,03d_0 - 48,92\lambda_s + 99,78L - 12317,46d_0^2 - 1,62L^2 \quad (3.11)$$

- При обработване на резби в месинг $CuZn39Pb3$:

$$M_{Bmax3} = -7797,87 + 995,22d_0 + 61,36\lambda_s + 791,59L - 100,35d_0L - 5,64\lambda_sL \quad (3.13)$$

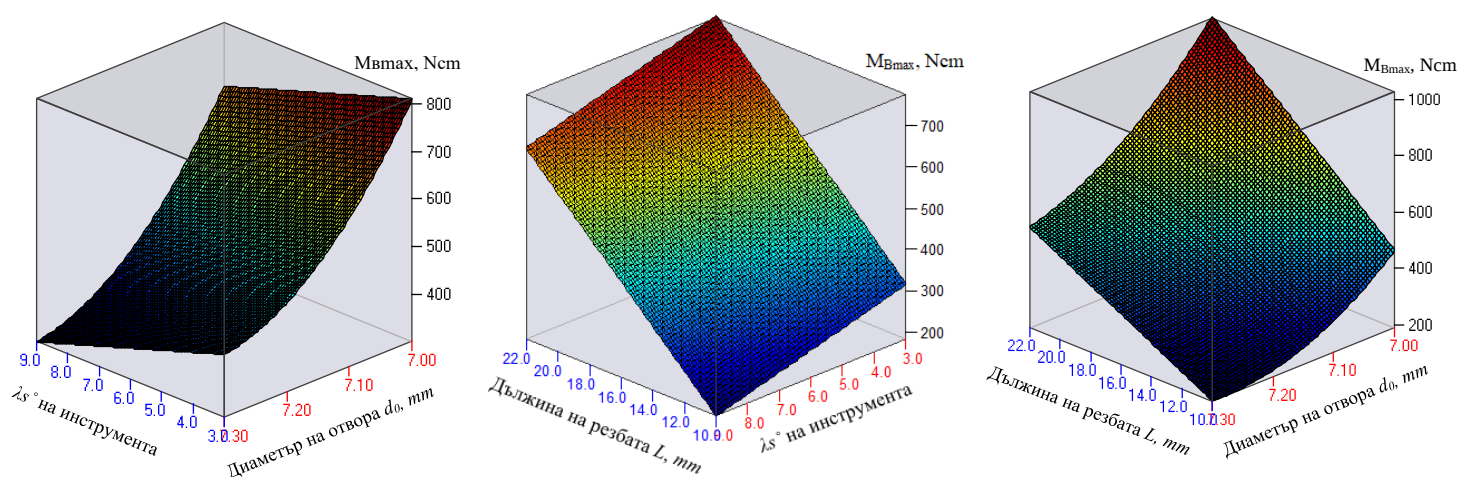
- При обработване на резби в стомана $C\ 10$:

$$M_{Bmax4} = 16926,68 - 2111,67d_0 + 81,46\lambda_s - 125,38L - 18,12\lambda_s^2 + 4,46L^2 + 4,53\lambda_sL \quad (3.15)$$

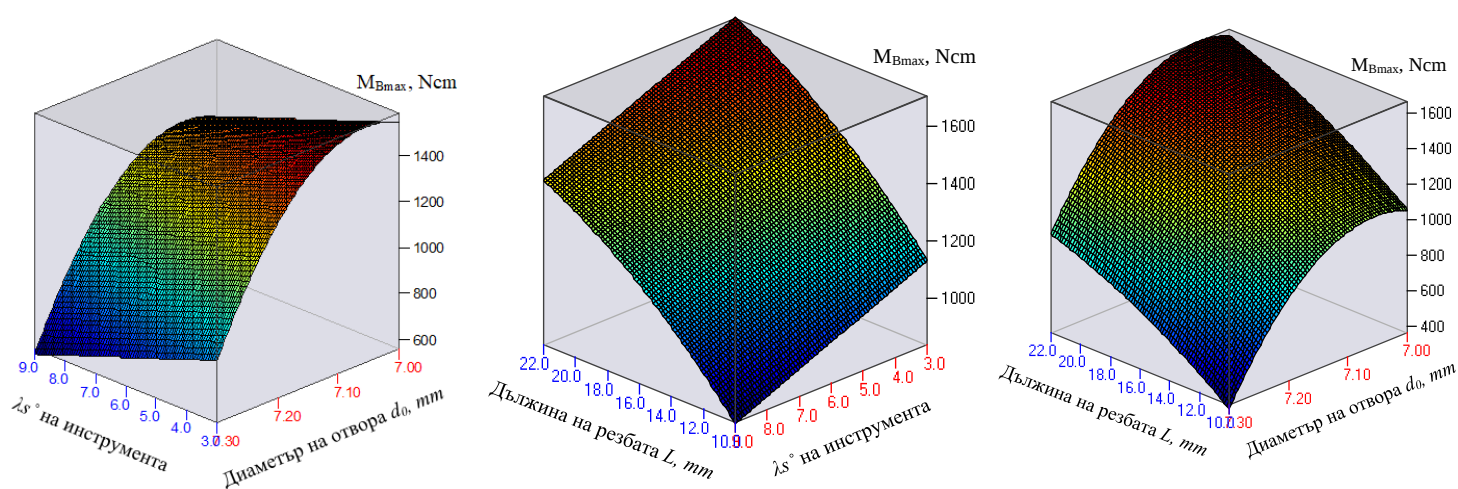
- При обработване на резби в стомана $C\ 50$:

$$M_{Bmax5} = 23352,08 - 3141,67d_0 - 38,42\lambda_s - 613,75L + 91,67d_0L \quad (3.17)$$

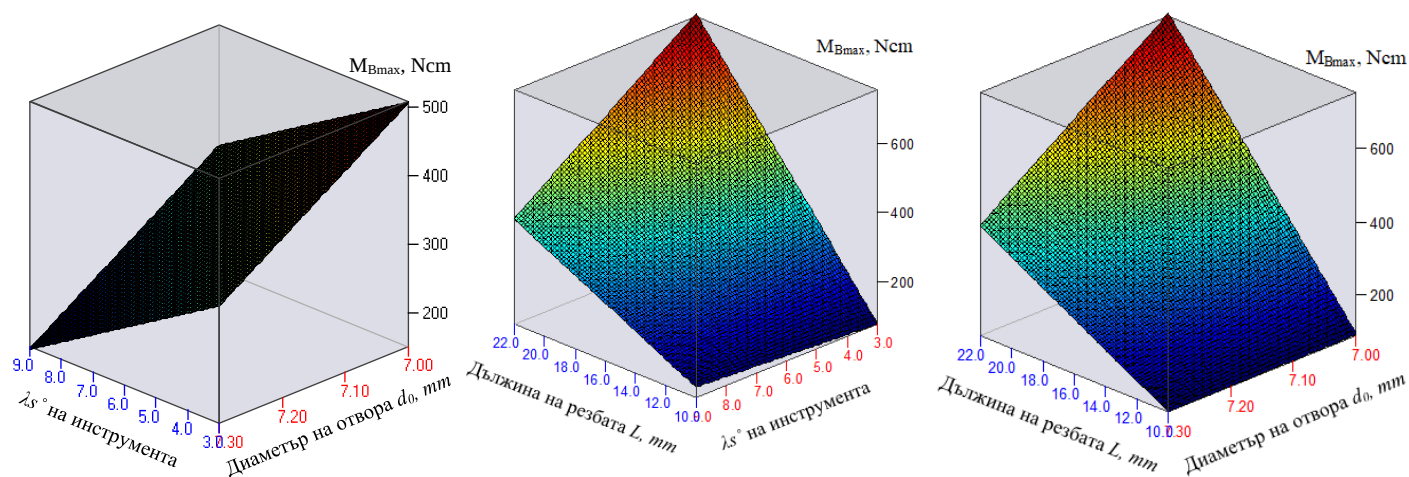
Графичните интерпретации на създадените модели са представени на фиг. 3.3., фиг. 3.8., фиг. 3.13., фиг. 3.18. и фиг. 3.23.



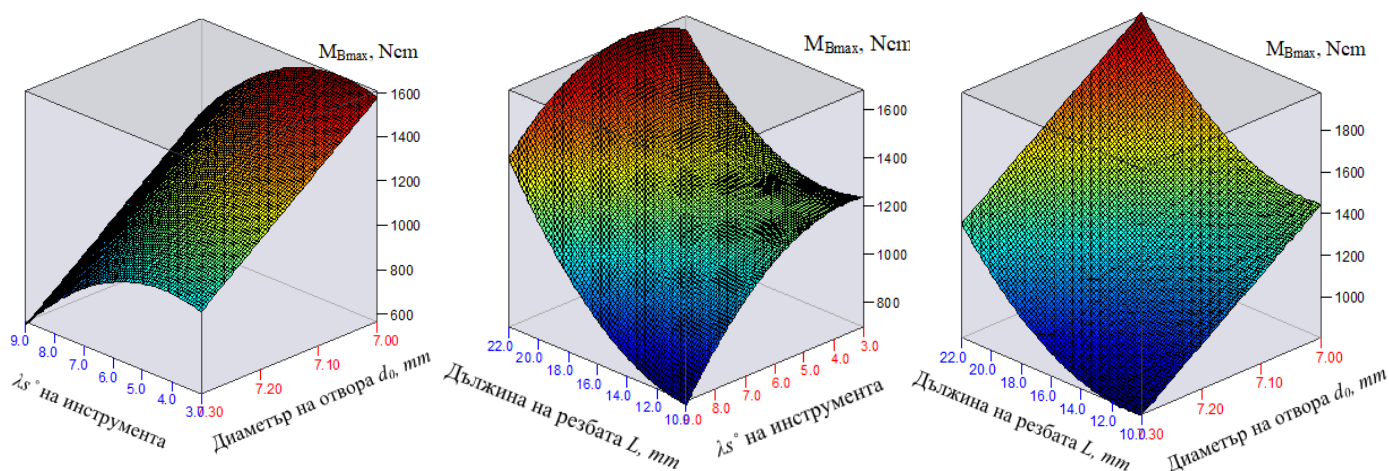
Фиг. 3.3. Зависимости на максималния въртящ момент M_{Bmax1} при обработване на резби в алуминиева сплав Al2024T3



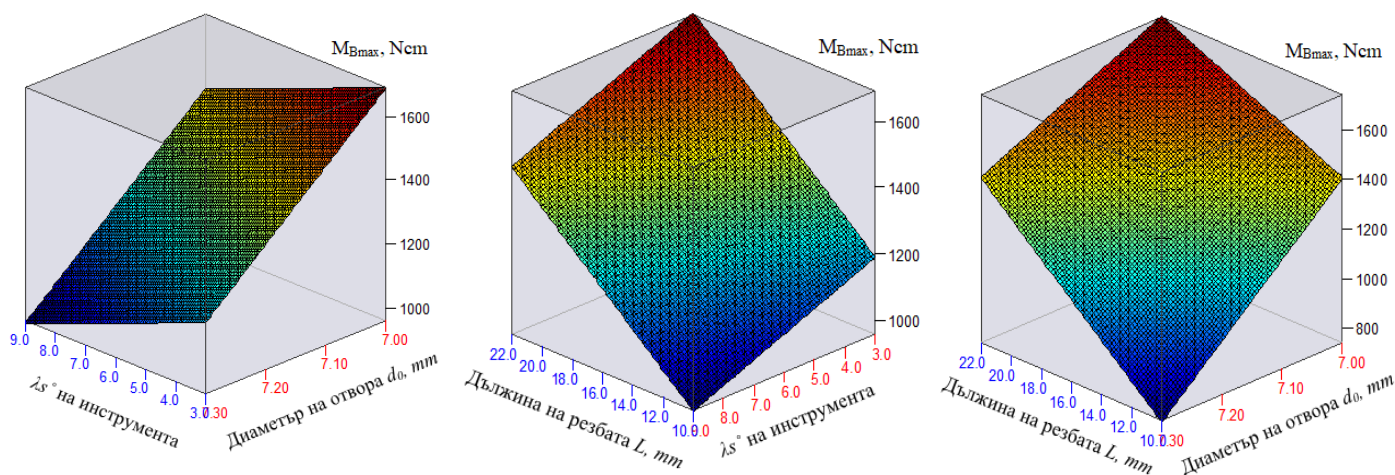
Фиг. 3.8. Зависимости на максималния въртящ момент M_{Bmax2} при обработване на резби в мед Cu 99,9%



Фиг. 3.13. Зависимости на максималния въртящ момент M_{Bmax3} при обработване на резби в месинг CuZn39Pb3



Фиг. 3.18. Зависимости на максималния въртящ момент M_{Bmax4} при обработване на резби в стомана C10



Фиг. 3.23. Зависимости на максималния въртящ момент M_{Bmax5} при обработване на резби в стомана C50

Анализът на създадените регресионни модели и на построените въз основа на тях графични зависимости, както и резултатите от проведения дисперсионен анализ показват:

- При формообразуване на резби в алуминиева сплав $Al\ 2024T3$ и месинг $CuZn39Pb3$ най-голямо влияние върху големината на изследвания максимален въртящ момент M_{Bmax} има дължината на резбата L . Влиянието ѝ е по-силно изразено при обработката на месинг $CuZn39Pb3$, като с нарастването ѝ максималният въртящ момент M_{Bmax} се увеличава до 10 пъти. Най-малко влияние върху максималния въртящ момент M_{Bmax} оказва ъгълът на наклона на стружковия канал на инструмента λ_s .

- При формообразуване на резби в мед $Cu\ 99,9\%$, стомана C10 и стомана C50 най-голямо влияние върху максималния въртящ момент M_{Bmax} оказва диаметърът на предварително обработения отвор d_0 . Най-голямо е изменението му при обработване на мед $Cu\ 99,9\%$, като с нарастване на d_0 максималният въртящ момент намалява до 4,2 пъти. Най-малко влияние върху максималния въртящ момент M_{Bmax} при обработване на мед $Cu\ 99,9\%$, стомана C10 и стомана C50 оказва ъгълът на наклона на стружковия канал на инструмента λ_s .

- Минимален въртящ момент M_{Bmax} при формообразуване на резби в алуминиева сплав $Al\ 2024T3$, мед $Cu\ 99,9\%$, стомана C10 и стомана C50 се получава при следната комбинация на управляващите фактори: $d_0 = 7,3\ mm$, $\lambda_s = 9^\circ$ и $L = 10\ mm$, а при обработване на месинг $CuZn39Pb3$ – при $d_0 = 7,3\ mm$, $\lambda_s = 3^\circ$ и $L = 10\ mm$.

Глава четвърта: Оптимизация на условията на формообразуване на вътрешни резби с режещо-деформиращи метчици

4.1. Едноцелева оптимизация на работоспособността на режещо-деформиращи метчици

Решаването на оптимизационната задача се свежда до определяне на комбинации на управляващите фактори, при които максималният въртящ момент M_{Bmax} , има минимална стойност за всеки от обработваните материали. Областите на изменение на факторите са: $7,0\text{ mm} \leq d_0 \leq 7,3\text{ mm}$; $3^\circ \leq \lambda_s \leq 9^\circ$; $10\text{ mm} \leq L \leq 22\text{ mm}$. Големината на максималния въртящ момент M_{Bmax} , се определя в съответствие със създадените теоретико-експериментални модели, отразяващи комплексното влияние на управляващите фактори при обработване на цветни метали и сплави (3.9, 3.11 и 3.13) и на ниско- и средновъглеродни стомани (3.15 и 3.17). В качеството на критерий за оптимизацията на работоспособността на изследваните режещо-деформиращи метчици е избран максималният въртящ момент M_{Bmax} .

За решаването на оптимизационната задача е използван програмният продукт QstatLab, като са приложени генетичен алгоритъм и методът на случайното търсене с нарастваща плътност.

В табл. 4.1 и 4.2 са представени определените оптимални стойности на управляващите фактори (d_0 , λ_s и L) съответно при обработване на цветни метали и сплави и на ниско- и средновъглеродни стомани.

Табл. 4.1 Оптимални условия за формообразуване на резби при обработване на цветни метали и сплави

Обработван материал	Метод на оптимизация	Управляващи фактори			M_{Bmax}, Ncm
		d_0, mm	λ_s, deg	L, mm	
Al2024T3	Генетичен алгоритъм	7,3	9	10	124,5
	Случайно търсене	7,3	9	10	123,4
Cu 99,9%	Генетичен алгоритъм	7,3	9	10	214,3
	Случайно търсене	7,3	9	10	214,3
CuZn39Pb3	Генетичен алгоритъм	7,3	3	10	72,6
	Случайно търсене	7,3	3	10	72,6

Табл. 4.2 Оптимални условия за формообразуване на резби при обработване на ниско- и средновъглеродни стомани

Обработван материал	Метод на оптимизация	Управляващи фактори			M_{Bmax}, Ncm
		d_0, mm	λ_s, deg	L, mm	
Стомана C10	Генетичен алгоритъм	7,3	9	10	377,8
	Случайно търсене	7,3	9	10	377,8
Стомана C50	Генетичен алгоритъм	7,3	9	10	626,3
	Случайно търсене	7,3	9	10	626,3

Определени са и комбинации от теоретични стойности на управляващите фактори, при които се получават минимални стойности на максималния въртящ момент M_{Bmax} за петте обработвани материала (табл. 4.3).

Получените резултати позволяват да се оцени обработваемостта на изследваните цветни метали и сплави и ниско- и средновъглеродни стомани при формообразуването на резби с режещо-деформиращи метчици.

Анализът показва, че най-добра обработваемост по критерия максимален въртящ момент M_{Bmax} , от изследваните цветни метали и сплави показва алуминиевата сплав Al 2024T3, а от изследваните стомани – стомана C10.

Табл. 4.3 Стойности на управляващите фактори, осигуряващи минимални стойности на максималните въртящи моменти $M_{\text{Вmax}}$ при формообразуване на резби в цветни метали и сплави и ниско- и средновъглеродни стомани

Метод на оптимизация	Управляващи фактори			$Y_j = M_{\text{Вmax}j}, \text{Ncm}$				
	d_0, mm	$\lambda_s, ^\circ$	L, mm	$M_{\text{Вmax}1}$	$M_{\text{Вmax}2}$	$M_{\text{Вmax}3}$	$M_{\text{Вmax}4}$	$M_{\text{Вmax}5}$
Генетичен алгоритъм	7,28	9,0	10,0	123,43	315,86	414,88	414,88	665,37
Случайно търсене с нарастваща плътност	7,23	8,95	10,03	134,78	577,64	535,33	535,33	784,96
	7,27	8,53	10,20	139,24	401,98	515,77	515,77	713,43
	7,28	8,71	10,31	139,37	331,68	465,25	465,25	685,83
	7,29	8,53	10,36	145,40	266,02	470,80	470,80	666,05
	7,29	8,97	10,78	147,70	326,97	411,26	411,26	692,51
	7,25	8,88	10,28	137,63	485,64	498,48	498,48	746,09

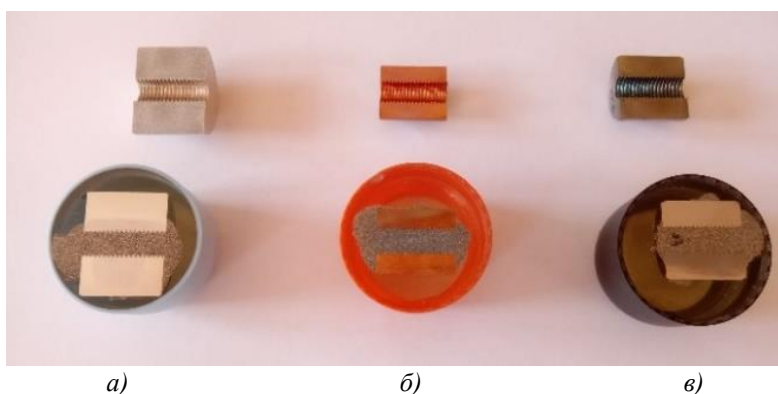
4.2. Изследване на структурата и микротвърдостта на обработени повърхнини след формообразуване на резби с режещо-деформиращи метчици

4.2.1. Материали, методи и измервателна апаратура за изследване

Проведена е качествена оценка на формообразуваната резба, като е използван резбови калибър за метрична резба M8x1,25-6H (преминаващ/ непреминаващ).

Установено е, че най-добро съответствие на геометричните параметри на обработената резба с тези по стандарт DIN13 се получава при следните стойности на управляващите фактори: диаметър на предварително обработеният отвор $d_0=7,1 \text{ mm}$, ъгъл на наклона на стружковия канал на инструмента $\lambda_s = 9^\circ$ и дължина на резбата $L=16 \text{ mm}$.

При тези работни условия са проведени изследвания за определяне на структурата и разпределението на микротвърдостта в повърхностния слой при формообразуване на резби с режещо-деформиращи метчици M8x1,25 в алуминиева сплав Al 2024T3, мед Cu 99,9% и средновъглеродна стомана C50 (фиг. 4.7).



Фиг. 4.7 Надлъжни илфове от алуминиева сплав Al 2024T3 (а), мед Cu 99,9% (б) и стомана C 50 (в)

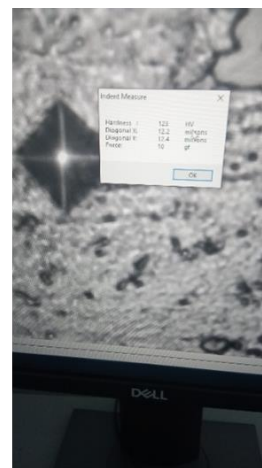
Структурата на материалите е изследвана с микроскоп CMEX PRO 5 с камера за наблюдение DC5000P (фиг. 4.8), като изследваните образци са наблюдавани с увеличение на обектива 50 и 200 пъти. Измерванията на повърхностната микротвърдост $HV_{0,01}$ са извършени в Технически университет – Габрово посредством микротвърдомер ZHV_μ Zwick/Roell, с възможност за компютърна обработка на резултатите от измерването (фиг. 4.9). Стойностите на микротвърдостите са измерени и съответстват на стандарт DIN EN ISO 6507-1:2018.



Фиг.4.8 Микроскоп с камера
CMECH PRO 5 DC5000P



а)



б)

Фиг.4.9 Твърдомер Zwick/Roell- а); компютърна
обработка на данни- б)

Твърдостта на повърхнината на формираната резба е измерена за всеки от изследваните материали, като са направени измервания в три сечения, разположени върху профила на резбата в посока от върха на резбата към сърцевината ѝ (фиг. 4.10). За всяко от тези сечения, перпендикулярни на профила на резбата, са направени по седем измервания с натоварване 0,01 kg.

4.2.2 Изследване на структурата на повърхнини, получени чрез формообразуване с режещо-деформиращи метчици

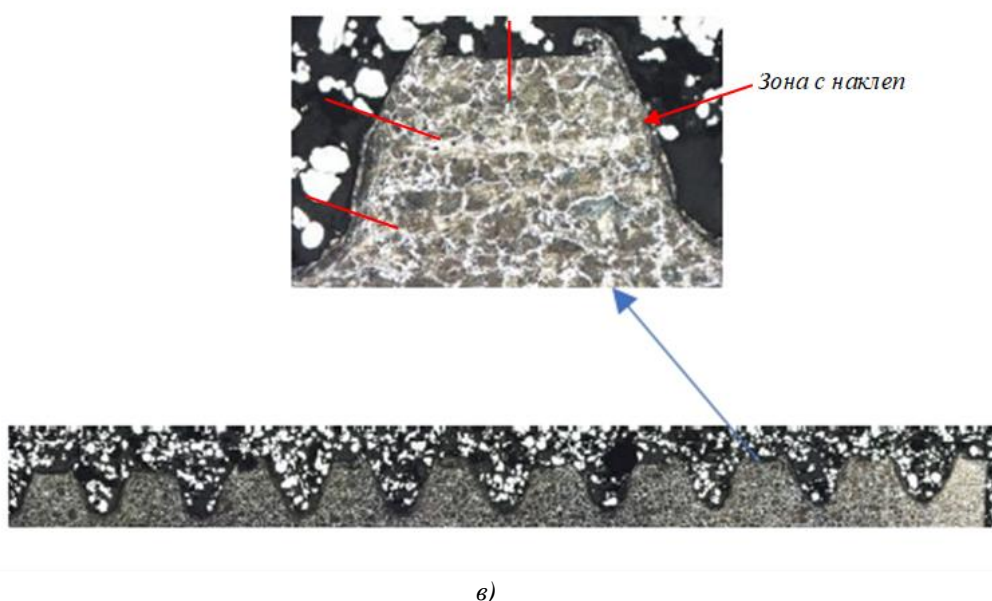
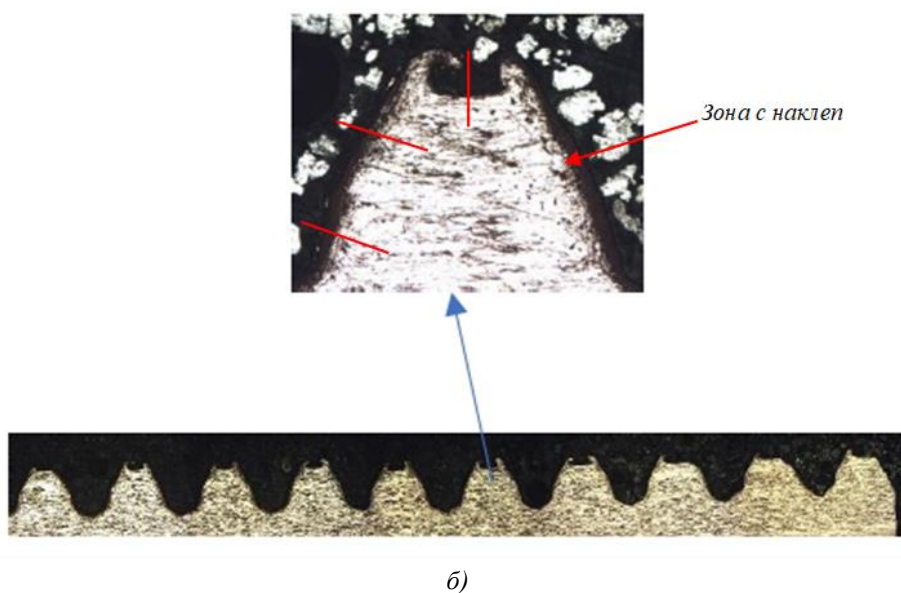
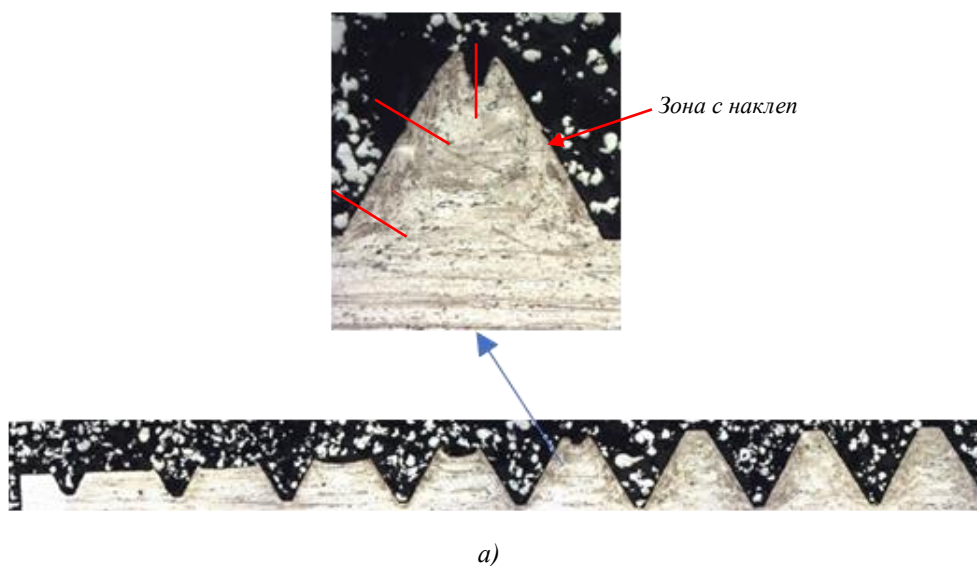
Микроструктурата в дълбочина на резбови повърхнини, получени чрез режещо-деформиращ метчик M8, върху детайли от алуминиева сплав Al 2024T3 (а), мед Cu 99,9% (б) и стомана C50 (в) е показана на фиг. 4.10.

При алуминиевата сплав (фиг. 4.10 а) и медта (фиг. 4.10 б) сърцевината е със силно изразена слоеста структура, докато при стомана C50 (фиг. 4.10 в) зърната са едноосни. Наблюдава се издребняване на зърната по повърхността вследствие на придвижването на метала от повърхността към върха на резбата.

Формираната резба има изразена влакнеста структура в повърхностния слой. Под влияние на пластичната деформация са се изменили физикомеханичните свойства на метала и се е образувала зона с наклеп (фиг. 4.10), повишаващ твърдостта на материала, което доказва, че резбата е формирана чрез рязане и пластична деформация.

4.2.3 Изследване на микротвърдостта на повърхнини, получени чрез режещо-деформиращи метчици

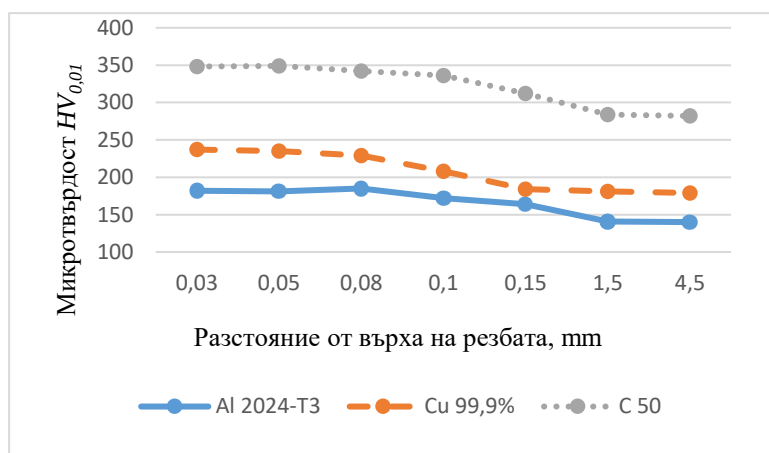
Резултатите от измерванията на микротвърдостта за трите обработвани материала са представени в табл. 4.4. Те са определени като средноаритметични стойности от измерванията за всяко от направленията на дълбочина 0,03 mm, 0,05 mm, 0,08 mm, 0,1 mm, 0,15 mm, 1,5 mm и 4,5 mm. Характерът на изменение на микротвърдостта в дълбочината на профила е показан на фиг. 4.11.



Фиг.4.10 Микроструктура на повърхностния слой на алуминиева сплав Al 2024T3 (а), мед Cu 99,9% (б) и стомана С 50 (в) при 200- и 50-кратно увеличение

Табл.4.4 Твърдост на повърхностния слой на резбови повърхнини от изследваните материал

Опитен образец	Алуминиева сплав Al 2024-T3	Мед Cu 99,9%	Стомана C 50
Номер на материал по Werkstoff	3.1355	2.0090	1.0540
Якост на опън, МПа	440-480	310-620	540-720
Проведени изследвания			
Създаване на структурни изображения с помощта на светлинен микроскоп CMEX PRO 5 DC5000P (фиг. 4.8)			
Определяне твърдостта на сърцевината с помощта на уред за измерване на твърдост ZHV_{μ} Zwick/Roell в $HV_{0,5}$	135	178	279
Определяне на SHD чрез измерване на твърдост в повърхностния слой на разстояние 0,03 mm от върха на контура в $HV_{0,01}$	182	237	348
Определяне на SHD чрез измерване на твърдост в повърхностния слой на разстояние 0,05 mm от върха на контура в $HV_{0,01}$	181	235	349
Определяне на SHD чрез измерване твърдост в повърхностния слой на разстояние 0,08 mm от върха на контура в $HV_{0,01}$	185	229	342
Определяне на SHD чрез измерване на твърдост в повърхностния слой на разстояние 0,1 mm от върха на контура в $HV_{0,01}$	172	208	336
Определяне на SHD чрез измерване на твърдост в повърхностния слой на разстояние 0,15 mm от върха на контура в $HV_{0,01}$	164	184	312
Определяне на SHD чрез измерване твърдост в повърхностния слой на разстояние 1,5 mm от върха на контура в $HV_{0,01}$	141	181	284
Определяне на SHD чрез измерване на твърдост в повърхностния слой на разстояние 4,5 mm от върха на контура в $HV_{0,01}$	140	179	282



Фиг. 4.11 Микротвърдост на повърхностния слой

Анализът на получените резултати (фиг. 4.11 и табл. 4.4) показва, че твърдостта на слоя метал, разположен близо до върха на резбата (на разстояние $\approx 0,1$ mm), получена след обработка с режещо-деформиращ метчик, е по-висока от първоначално измерената твърдост на изследваните материали, както следва:

- за проба от алуминиева сплав Al 2024T3 – с 35% ($HV_{0,01Al} \approx 182$);
- за проба от мед Cu 99,9% – с 30% ($HV_{0,01Cu} \approx 237$);
- за проба от стомана C 50 – с 24% ($HV_{0,01C50} \approx 349$).

4.3. Сравнително изследване на работоспособността на режещи, деформиращи и режещо-деформиращи метчици

Работоспособността на изследваните режещи, деформиращи и режещо-деформиращи метчици е оценена по критерия максимален въртящ момент M_{Bmax} . Изследванията са проведени при формообразуване на резби М8 с дължина $L=16\text{ mm}$ при еднаква скорост на формообразуване $V_c \approx 6,3\text{ m/min}$ (честота на въртене $n_c=250\text{ min}^{-1}$) в алуминиева сплав $Al\ 2024T3$, мед $Cu\ 99,9\%$, месинг $CuZn39Pb3$, стомана $C10$ и стомана $C50$. За да се гарантира качество на обработената резба, диаметрите на предварително обработените отвори d_0 са:

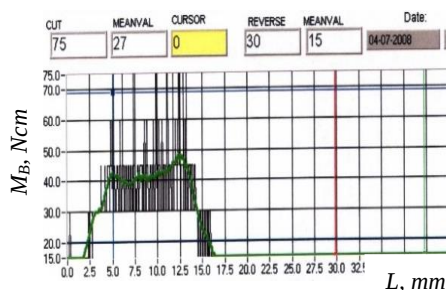
- за режещ метчик $d_0=6,8\text{ mm}$;
- за деформиращ метчик $d_0=7,4\text{ mm}$;
- за режещо-деформиращ метчик $d_0=7,1\text{ mm}$.

Стойностите на диаметрите на предварително обработените отвори (d_0) при работа с режещи и деформиращи метчици са в съответствие с препоръчителните стойности, посочени от фирмите производители на тези инструменти. Диаметърът на предварително обработения отвор (d_0) за режещо-деформиращи метчици е определен в съответствие с проведеното качествено изследване на геометричната точност на резбата (Глава 4.2).

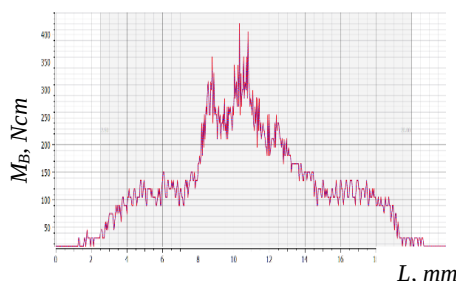
Характерът на изменение на максималните въртящи моменти M_{Bmax} при формообразуване на резби с режещи, деформиращи и режещо-деформиращи метчици при обработване на цветни метали и сплави и ниско- и средновъглеродни стомани е показан на фиг. 4.12 – фиг. 4.16, а определените максимални въртящи моменти M_{Bmax} при формообразуване на резби в тези материали – в табл. 4.5.

Табл. 4.5 Въртящ момент при формообразуване на резби в цветни метали и сплави и ниско- и средновъглеродни стомани с режещи, деформиращи и режещо-деформиращи метчици

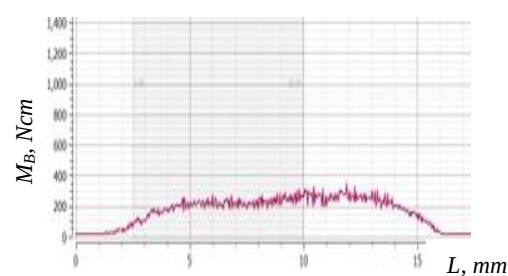
Изследван метчик	$M_{Bmax},\text{ Ncm}$				
	Al 2024T3	Cu 99,9%	CuZn39Pb3	C10	C50
	M_{Bmax1m}	M_{Bmax2m}	M_{Bmax3m}	M_{Bmax4m}	M_{Bmax5m}
Режещ	107,5	725	262,5	630	937,5
Деформиращ	450	892,5	592,5	1387,5	1875
Режещо-деформиращ	345	832,5	157,5	862,5	1135



а)

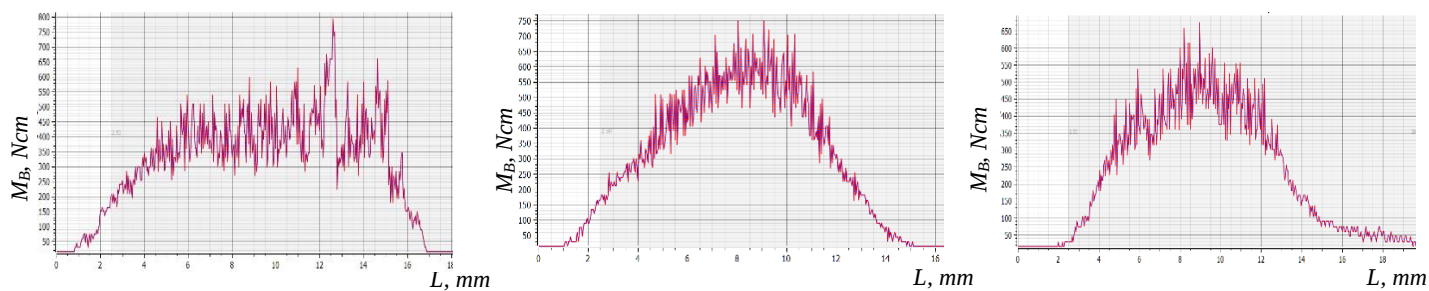


б)

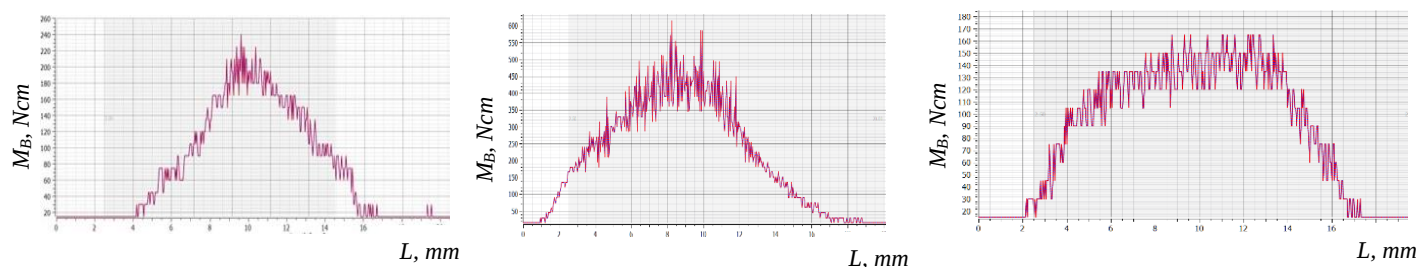


в)

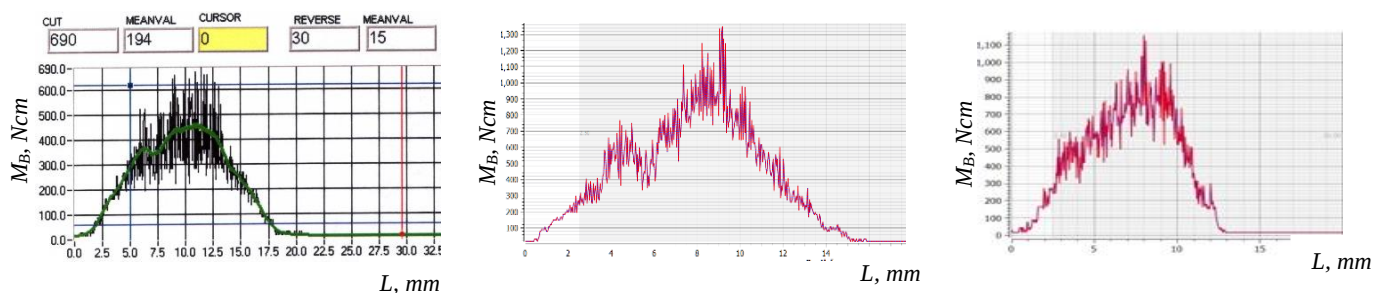
Фиг. 4.12. Въртящ момент M_B при обработване на резби в алуминиева сплав $Al\ 2024T3$ с: режещ метчик (а); деформиращ метчик (б); режещо-деформиращ метчик (в)



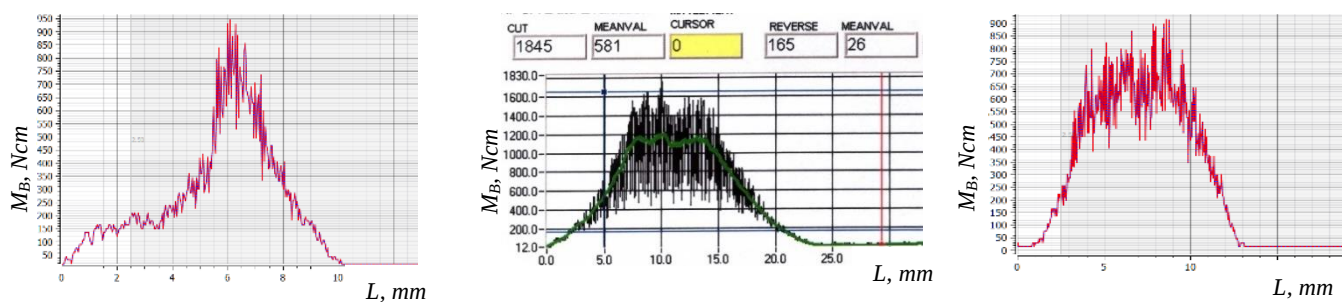
Фиг. 4.13. Въртящ момент M_B при обработване на резби в мед Cu 99,9% с: режещ метчик (а); деформиращ метчик (б); режещо-деформиращ метчик (в);



Фиг. 4.14. Въртящ момент M_B при обработване на резби в месинг CuZn39Pb3 с: режещ метчик (а); деформиращ метчик (б); режещо-деформиращ метчик (в);



Фиг. 4.15. Въртящ момент M_B при обработване на резби в стомана C10 с: режещ метчик (а); деформиращ метчик (б); режещо-деформиращ метчик (в);



Фиг. 4.16. Въртящ момент M_B при обработване на резби в стомана C50 с: режещ метчик (а); деформиращ метчик (б); режещо-деформиращ метчик (в);

Анализът на получените резултати показва, че изследваните режещо-деформиращи метчици имат по-добра работоспособност по критерия максимален въртящ момент M_{Bmax} в сравнение с деформиращите метчици както при обработване на цветни метали и сплави, така и при обработване на ниско- и средновъглеродни стомани. За цветни метали и сплави най-голяма е разликата в големините на максималния въртящ момент M_{Bmax} , при формообразуване на резби в детайли от месинг $CuZn39Pb3$ (3,7 пъти), а най-малка – при формообразуване на резби в детайли от мед Cu 99,9% (7%). При обработване на ниско- и средновъглеродни стомани ($C10$ и $C50$) максималния въртящ момент M_{Bmax} , при формообразуване на резби с режещо-деформиращи метчици е по-малък от този при обработване с деформиращи метчици приблизително 39%.

Режещо-деформиращите метчици отстъпват по отношение на работоспособността, оценена с критерия максимален въртящ момент M_{Bmax} , на режещите метчици. При обработка на резби в алуминиева сплав $Al\ 2024T3$ и мед Cu 99,9% разликата в максималния въртящ момент M_{Bmax} , е съответно 3,2 пъти и 14%, а при обработка на резби в ниско- и средновъглеродни стомани – 17% и 27%. При обработване на резби в месинг $CuZn39Pb3$ режещо-деформиращите метчици показват по-добра работоспособност по критерия максимален въртящ момент M_{Bmax} , като максималният въртящ момент M_{Bmax} е по-малък с 40% в сравнение с този при режещите метчици.

Заклучение

Направен е анализ на съществуващите методи за формообразуване на вътрешни резби и е доказана необходимостта от изследването на нова конструкция режещо-деформиращи метчици при обработване на материали с различни физикомеханични свойства.

Разработена е методика за аналитично определяне на диаметъра на предварително обработения отвор при формообразуване на резби с режещо-деформиращи метчици, която отчита влиянието на коефициента η , определен като отношение на прибавките за рязане и пластична деформация, и физикомеханичните свойства на обработвания материал.

Предложена е методика за експериментално изследване на работоспособността на режещо-деформиращи метчици по параметъра въртящ момент M_B . В съответствие с тази методика са проведени еднофакторни експерименти за установяване на влиянието на скоростта на формообразуване V_c , диаметъра на предварително обработения отвор d_0 , ъгъла на наклона на стружковия канал на инструмента λ_s и дължината на резбата L върху въртящия момент M_B при обработване на материали с различни физикомеханични свойства (цветни метали и сплави – алуминиева сплав $Al2024T3$, мед Cu 99,9% и месинг $CuZn39Pb3$; ниско- и средновъглеродни стомани – $C10$ и $C50$). Установено е, че скоростта на формообразуване V_c не влияе съществено върху максималния въртящ момент M_{Bmax} , като изменението му е средно с 2,44% при увеличаване на скоростта от $V_c \approx 6,3\ m/min$ до $V_c \approx 7,9\ m/min$. В резултат на това, в качеството на управляващи фактори на процеса на формообразуване на резби с режещо-деформиращи метчици са избрани диаметърът на предварително обработения отвор d_0 , ъгълът на наклона на стружковия канал на инструмента λ_s и дължината на резбата L .

Проведени са многофакторни планирани експерименти по оптимален централно-композиционен план за установяване на комплексното влияние на диаметъра на предварително обработения отвор d_0 , ъгъла на наклона на стружковия канал на инструмента λ_s и дължината на резбата L , върху максималния въртящ момент M_{Bmax} при обработване на цветни метали и сплави и ниско- и средновъглеродни стомани и са построени съответни адекватни теоретико-експериментални модели.

Въз основа на анализа на построените регресионни модели и чрез използване на метода на дисперсионния анализ са определени степента и характерът на влияние на управляващите фактори върху максималния въртящ момент M_{Bmax} при формообразуване

на резби в материали с различни физикомеханични свойства. Установено е, че най-голямо влияние върху максималния въртящ момент M_{Bmax} при обработване на алуминиева сплав $Al\ 2024T3$ и месинг $CuZn39Pb3$ има дължината на резбата L , като с увеличаването на L максималният въртящ момент M_{Bmax} нараства. При обработване на мед $Cu\ 99,9\%$, стомана $C10$ и стомана $C\ 50$ най-силно е влиянието на диаметъра на предварително обработения отвор d_0 , с нарастването на който максималният въртящ момент M_{Bmax} намалява.

Проведена е едноцелева оптимизация на работоспособността на изследваните режещо-деформиращи метчици. Определени са стойностите на управляващите фактори, при които максималният въртящ момент M_{Bmax} приема минимални стойности:

- $d_0=7,3\ mm$, $\lambda_s=9^\circ$ и $L=10\ mm$ при формообразуване на резби в алуминиева сплав $Al2024T3$, мед $Cu\ 99,9\%$ и стомани $C10$ и $C50$;

- $d_0=7,3\ mm$, $\lambda_s=3^\circ$, и $L=10\ mm$ при формообразуване на резби в месинг $CuZn39Pb3$.

Сравнена е обработваемостта на изследваните материали с режещо-деформиращи метчици по критерия максимален въртящ момент M_{Bmax} и е установено, че най-добра обработваемост от изследваните цветни метали и сплави показва алуминиевата сплав $Al2024T3$, а от изследваните стомани – стомана $C10$.

Проведена е качествена оценка на формообразуваната резба и е установено, че най-добро съответствие на геометричните параметри на резбата, получена чрез формообразуване с режещо-деформиращи метчици, с тази по стандарт DIN 13 се получава при следните стойности на управляващите фактори: $d_0=7,1\ mm$, $\lambda_s=9^\circ$ и $L=16\ mm$.

Проведено е изследване на микроструктурата и микротвърдостта на формообразуваните резбови повърхнини с режещо-деформиращи метчици. Установено е, че твърдостта на повърхностния слой нараства с 35%, 30% и 24% съответно след обработване на детайли от алуминиева сплав $Al2024T3$, мед $Cu\ 99,9\%$ и стомана $C50$.

В резултат на използване на режещо-деформиращ метчик формираната резба има изразена влакнеста структура в повърхностният си слой, като под влияние на пластичната деформация са се изменили физикомеханичните свойства на метала и се е образувала зона с наклеп, повишаващ твърдостта на материала, което доказва, че резбата е формирана чрез рязане и пластична деформация.

Проведено е сравнително изследване на работоспособността на режещи, деформиращи и режещо-деформиращи метчици по критерия максимален въртящ момент M_{Bmax} . Установено е, че при обработване на алуминиева сплав $Al2024T3$, мед $Cu\ 99,9\%$, стомана $C10$ и стомана $C50$ режещо-деформиращите метчици показват по-добра работоспособност в сравнение с деформиращите метчици, но отстъпват на режещите метчици. При обработване на месинг $CuZn39Pb3$ режещо-деформиращите метчици имат по-добра работоспособност в сравнение с режещите и деформиращите метчици.

ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Научно-приложни приноси

- Разработена е методика за теоретично изследване на процеса формообразуване с режещо-деформиращи метчици, която позволява определяне на диаметъра на предварително обработените отвори в зависимост от диаметъра на формообразуваната резба, съотношението на прибавките за рязане и пластична деформация и физикомеханичните свойства на обработваните материали (цветни метали и сплави и стомани).

- На базата на проведени еднофакторни експерименти на нова конструкция режещо-деформиращи метчици, оценена по параметъра въртящ момент, са определени управляващите фактори на процеса на формообразуване на резбата (диаметър на

предварително обработения отвор, ъгъл на наклона на стружковия канал на инструмента и дължина на резбата).

- Построени са адекватни теоретико-експериментални модели, отразяващи комплексното влияние на диаметъра на предварително обработения отвор d_0 , ъгъла на наклона на стружковия канал на инструмента λ_s и дължината на резбата L върху максималния въртящ момент M_{Bmax} при формообразуване на резби в цветни метали и сплави (алуминиева сплав $Al2024T3$, мед Cu 99,9% и месинг $CuZn39Pb3$), и ниско- и средновъглеродни стомани ($C10$ и $C50$).

- Предложена е методика за едноцелева оптимизация на работоспособността на изследваните режещо-деформиращи метчици, въз основа на която са определени оптималните условия за формообразуване на резби в материали с различни физикомеханични свойства.

- Доказано е, че обработената резба с новата конструкция режещо-деформиращи метчици е формирана в резултат на процесите рязане и пластична деформация, което определя високото ѝ качество, оценено с твърдостта и микроструктурата на повърхностния слой на резбовата повърхнина.

- Получени са сравнителни резултати за режещи, деформиращи и режещо-деформиращи метчици, с които е доказано, че изследваните нови режещо-деформиращи метчици имат предимство по критерия максимален въртящ момент в сравнение с деформиращите при обработване на алуминиева сплав, мед, месинг и ниско- и средновъглеродни стомани, а при обработването на месинг – и по отношение на режещите метчици.

Приложни приноси

- Получени са данни за диаметрите на предварително обработените отвори при формообразуване на резби $M6 \div M12$ с нова конструкция режещо-деформиращи метчици в цветни метали и сплави (алуминиева сплав $Al2024T3$, мед Cu 99,9%, и месинг $CuZn39Pb3$) и ниско- и средновъглеродни стомани ($C10$ и $C50$) при различно съотношение на прибавките за рязане и пластична деформация, които могат да се ползват в машиностроителната практика.

- Определени са комбинации от стойности на диаметъра на предварително обработения отвор d_0 , ъгъла на наклона на стружковия канал на инструмента λ_s и дължината на резбата L , осигуряващи минимален въртящ момент M_B при формообразуване на резба $M8$ с нова конструкция режещо-деформиращи метчици в алуминиева сплав, мед, месинг и два вида стомани.

- Доказана е ефективността на новата конструкция режещо-деформиращи метчици при обработване на отвори с малък диаметър и материали със сравнително ниска твърдост и добра пластичност.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Radev H. Formation on internal threads with taps. In: International Scientific Conference UNITECH 2021, Gabrovo, Bulgaria, 2021, vol. II, pp. 48 - 53. ISSN 1313-230X.
2. Radev H., Mitev H., Yakimov H. Analysis of tapping torque studies with different types of taps. International Scientific Conference UNITECH 2022, Gabrovo, Bulgaria, Proceedings, 18-19 November 2022, vol. II, pp. 78 - 82, ISSN 1313-230X.
3. Радев Х, Александрова И. Аналитично определяне на диаметъра на предварително обработения отвор при формообразуване на резби с режещо-деформиращи метчици. В: Национална конференция по машиностроене и машинознание, 08-10.09.2023 г., Варна. (Машиностроене и машинознание 2024; 34(1): 3 – 8. ISSN 1312-8612).
4. Радев Х, Александрова И. Изследване на въртящия момент при формообразуване на резби с режещо-деформиращи метчици. В: Национална конференция по машиностроене и машинознание, 08-10.09.2023 г., Варна (Машиностроене и машинознание 2024; 34(1): 9 – 13. ISSN 1312-8612).
5. Радев Х. Изследване на микротвърдостта и структурата на резбови повърхнини, получени чрез формообразуване с режещо-деформиращи метчици. В: Национална научна конференция TechCo – Lovech 2024. 169-175, ISSN 2535-079X

TITLE: RESEARCH OF THE PROCESS OF FORMING OF INTERNAL THREADS

Author: mag. eng. Hristo Tsvetanov Radev

ABSTRACT

The systematization and analysis of the methods and tools for forming internal threads with sizes M5-M12 show that the most widely used tools are taps. Depending on the methods for forming the thread, they are classified into three main groups - cutting, deforming (chipless) and combined - cutting-deforming.

The dissertation presents the results of a comprehensive (theoretical and experimental) study and modeling of the performance of a newly developed cutting-deforming tap design for thread forming in materials with different physicomechanical properties. The optimal working conditions have been determined, which guarantee, on the one hand, the performance of the tools, and on the other hand, the quality of the processed thread.

Data were obtained on the diameters of pre-machined holes when forming M6 ÷ M12 threads with a new design of cutting-deforming taps in non-ferrous metals and alloys (aluminum alloy Al2024T3, copper Cu 99.9%, and brass CuZn39Pb3) and low- and medium-carbon steels (C10 and C50) at different ratios of cutting and plastic deformation allowances, which can be used in mechanical engineering practice.

Combinations of values of the diameter of the pre-machined hole d_0 , the rake angle of the tool λ_s and the thread length L have been determined, ensuring a minimum torque M_B when forming an M8 thread.

Keywords: *internal thread forming, taps, forming taps, cutting-deforming taps, tool operability, maximum torque, modeling, optimization, the diameter of the pre-machined hole, the rake angle of the tool, thread length, microstructure, microhardness.*