

УДК 621.923

О.А. Гавриш, к.т.н., с.н.с.

Державне підприємство "Науково-технічний центр артилерійсько-стрілецького озброєння України"

П.О. Киричок, д.т.н., проф.

*Національний технічний університет України "КПІ"***ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ СТАЛЕВИМИ ЩІТКАМИ НА СТУПІНЬ ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ МЕТАЛУ**

Розглянуто питання забезпечення якості поверхні матеріалів сталевими щітками з гнучкими робочими елементами у процесах обробки та призначення раціональних режимів різання, характеристик інструменту та технологічних факторів.

У машинобудівних галузях промисловості набула широкого розповсюдження поверхнева оздоблювально-зміцнююча обробка (ПОЗО) методами термомеханічного оброблення (ТМО). На жаль, незважаючи на значну кількість публікацій з питань ПОЗО ТМО [1–5], дослідженням впливу технологічних режимів ТМО деталей сталевими щітками на ступінь зміцнення поверхневих шарів металу майже ніхто не займався. Більшість досліджень присвячено питанням отримання необхідних шорсткостей поверхонь і якості їх очищення від корозійного напорування і технологічного бруду.

Це обумовило появу у виробництві різних за характеристиками процесів ПОЗО, які здебільшого є досить не оптимальними і найчастіше призначені для забезпечення окремих, хоча нерідко і складних, інженерно-технічних задач.

Тому всебічне дослідження впливу технологічних режимів ТМО деталей сталевими щітками на ступінь зміцнення поверхневих шарів металу є актуальним питанням, вирішення якого має не тільки наукове, але, що не менш важливо, – практичне значення.

Саме цьому присвячена дана стаття, метою якої є вивчення впливу режимів ТМО на показники зміцнення поверхневих шарів металу.

Дослідження цього питання виконувалось у рамках науково-дослідної роботи "Розробка технології і обладнання для об'ємного зміцнення виробів методом термомеханічної обробки" (Державні науково-технічні програми 05.43, 04.04 ДКНТ та Міннауки України за 1994–97 рр.).

В основу проведення експериментальних досліджень покладалось встановлення товщини зміцненого шару поверхні заздалегідь підготовлених зразків листового прокату з встановленою вихідною твердістю матеріалу, обробленого дисковими сталевими щітками (ДСЩ) методами ТМО з під'єднанням електроструму та в режимі лише механічного контактування. Товщина зміцненого шару оцінювалась згідно з розподілом мікротвердості H_{μ} вимірювання якої проводилось методом мікроструктурного аналізу [6].

Вимірювання проводились на вирізаних із зміцнених заготовок призматичних зразках розміром 10×10×30 мм. Вирізування зразків здійснювали на універсально-фрезерувальному верстаті з малими швидкостями і подачами за умови нагнітання в зону різання значної кількості змазувально-охолоджуючої рідини (ЗОР). Операція вирізування передбачала припуск (0,1...0,2) мм для наступного притирання, шліфування та полірування при виготовленні шліфів зрізу зразків ($\alpha = 2,5^\circ$ до поверхні). Процес притирання проводився на чавунній плиті, а шліфування здійснювалось шліфувальними шкурками (без застосування ЗОР) від марки Д2Е УІГ 63С40-Н/25 СФЖ (ГОСТ 13344-79) до АС6 100/80 ТУ 2-037-88-78. Остаточне полірування проводилось алмазною пастою АМ 20/14 ПВМ (ГОСТ 16877-71) за спеціальною технологією [7]. З метою уникнення можливого завалювання країв зразки при виготовленні шліфів заливали самотверднучою пластмасою АССТТ-1 ("Протакрил").

Підготовлений шліф мав шорсткість поверхні, що відповідала вимогам ГОСТ 2789-82 ($R_z = 0,01...0,025$), після чого поверхня підлягала травленню та освітленню і при 120-кратному збільшенні з використанням мікроскопу типу ММІ за проявленнями внаслідок травлення шліфа лініями ковзання на деформованих зернах вимірювали товщину зміцненого шару, яку приймали такою, що дорівнює відстані від краю зміцненої поверхні до групи з трьох зерен металу без лінії ковзання.

Ступінь зміцнення поверхні вираховували як відсоткове відношення різниці поверхневої мікротвердості обробленого зразка H_n і вихідної мікротвердості поверхневого шару H_a за формулою [8]:

$$E_n = [H_n - H_a / H_a] \cdot 100 \% .$$

Впливи режимів оброблення на ступені зміцнення поверхневого шару визначались шляхом проведення ряду дослідів у послідовності, встановленій згідно з попередньо розробленим планування факторних експериментів на основі планів матриць факторних експериментів (повного і дробового).

Матриця плану дослідження ступеня зміцнення поверхні у процесі ТМО складена згідно з дробовим факторним експериментом за планом типу 2^{7-4} , а для режиму механічного оброблення – типу 2^{6-3} . В технології машинобудування залежності, що встановлюють зв'язок між параметрами оптимізації і факторами процесу оброблення металу описуються виразами степеневого виду. Можна припустити, що для даного процесу поверхневого оздоблювально-зміцнюючого оброблення (ПОЗО) математичні моделі степеневого виду, які за факторами є нелінійними, адекватно встановлюють зв'язок між параметрами оптимізації та кількісними факторами процесу. Логарифмуючи, степенева модель зводиться до лінійного виду, а рівняння регресії отримає такий вигляд [9]:

$$Y = b_0 + \sum_{p=1} b_p X_p + \sum_{ij} b_{ij} X_i X_j + \sum_{ijk} b_{ijk} X_i X_j X_k ,$$

де Y – функція відклику моделі;

$b_0, b_{ij}, b_p, b_{ijk}$ – коефіцієнти регресії;

x_i, x_j, x_k, x_p – кодове позначення змінних факторів.

Визначення коефіцієнтів регресії проводилось з використанням середнього значення логарифмів показника оптимізації, отриманого за реалізації двократних паралельних спостережень. Обробка результатів виконувалась згідно з відомою методикою [9], яка включає статистичний аналіз результатів. Адекватність регресійних рівнянь прирівнювалась до критерію Фішера з рівнем значущості $\alpha' = 5\%$. Значення статистичних критеріїв (Кохрена – σ_T ; Стьюдента – $t_{кр}$; Фішера – $F_{кр}$) встановлювались згідно з рекомендаціями відповідних таблиць [9, 10].

Основні фактори техпроцесу ПОЗО та рівні їх варіювання наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Рівні варіювання параметри ТМО

№ з/п	Характеристики факторів	Рівні варіювання		Інтервал варіювання
		верхній	нижній	
1	Колова швидкість інструмента $V_{ш}$, м/с	20,1	7,55	12,55
2	Подача інструмента (деталі) S , м/с	$1,33 \cdot 10^{-2}$	$4,166 \cdot 10^{-3}$	$9,134 \cdot 10^{-3}$
3	Натяг ГРЕ H_H , м	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$
4	Ширина робочої поверхні інструмента B , м	$7,0 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$
5	Кількість секцій з ГРЕ C^* , шт	10	4	6
6	Довжина вільного вильоту ГРЕ l , м	$6,5 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-2}$
7	Сила струму I , А	125	30	95
8	Маса ЖРЕ m , кг	$1,1 \cdot 10^{-1}$	$8,5 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$
9	Товщина шару корозії h_K , м	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$

*Кількість струмопровідних секцій – $C = 2$.

У всіх проведених експериментах залишались незмінними:

- зовнішній діаметр ДСЦ – $D = 2R = 0,32$ м;
- діаметр гнучких робочих елементів (ГРЕ) секцій очищення – $d = 0,8 \cdot 10^{-4}$ м;
- напруга електроструму в мережі – $U = 80$ В;
- кількість ГРЕ в струмопровідній секції ДСЦ – $K_{\Sigma} = 132 \pm 10$ шт.

Математична модель впливу технологічних параметрів процесу ПОЗО на товщину зміцненого поверхневого шару металу наведена у вигляді адекватних степеневих залежностей окремо для ТМО і процесу лише механічного контактування:

$$h_z^{T(s)} = b \cdot V_m^{b_1} \cdot H_H^{b_2} \cdot l^{b_3} \cdot C^{b_4} \cdot B^{b_5} \cdot S^{b_6} \cdot l^{b_7} \cdot h_K^{b_8} \quad (1)$$

Показники степенів і постійні коефіцієнти наведені в табл. 2. Графічне відображення залежностей процесу представлені на рис. 1–4.

Як зазначалось вище, особливість даного методу ПОЗО полягає в можливості контактної взаємодії ГРЕ секцій інструмента як у суміжних режимах ТМО (з під'єднанням електроструму до системи інструмент–деталь), так і лише динамічної взаємодії (без задіяння струму), що значно розширює діапазон технологічних можливостей методу та інструмента ПОЗО.

Експериментально встановлено, що тепловий вплив дугових розрядів у процесі гартування поверхневого шару основного металу виробу здатний зміцнити метал на значно більшу глибину, ніж внаслідок зміцнення лише динамічним контактуванням. Так, у процесі ПОЗО ТМО за певних технологічних режимів (рис. 3) зразок із нормалізованої сталі 45 з мікротвердістю серцевини $H_\mu = 1960 \dots 2080$ МПа отримав зміцнення верхнього шару до $H_\mu = 6400$ МПа, а нижнього – до $H_\mu = 1600$ МПа. На глибині 430 мкм мікротвердість становитиме $H_\mu = 5500$ МПа, після чого йде зниження твердості до вихідної. Найбільша глибина, на якій вдалось зафіксувати показники змін мікротвердості становила 1260 мкм.

Оброблення зразків з того ж матеріалу лише в режимі динамічного контактування ГРЕ за однакових з попередніми технологічними режимами (рис. 4) дозволило зміцнити верхній шар до мікротвердості $H_\mu = 4700$ МПа, а нижній – до $H_\mu = 2400$ МПа з товщиною даного шару 200 мкм і подальшим зменшенням до вихідної.

Досить інтенсивне зміцнювання поверхневого шару матеріалу зберігається до певної його глибини, після чого (незалежно від зростання значень H_H та V_m) це зростання майже повністю зникає. Ступінь зміцнення матеріалу зразків із зростаючою зміною даних технологічних режимів збільшується в 2,5...3 рази, що відповідає результатам аналітичних розрахунків, проведених згідно з наведеною методикою і відображених на графіках штриховими лініями (---).

Зниження інтенсивності приросту товщини зміцненого шару а також повне його зникнення пояснюються тим, що значення контактних напружень у матеріалі поверхневого шару зразків досягає певних значень, при яких зникає здатність металу до деформування, відбувається руйнування його поверхневого шару.

В поверхневому шарі зразків утворюються субмікроскопічні мікротріщини, зменшується поверхнева мікротвердість, утворюються осередки злуццювання матеріалу, що вказує на явище перенаклепу. Аналогічне явище спостерігав Д.Д. Папшев при дослідженні процесу поверхневого зміцнення металу механічними металевими щітками [4].

Збільшення діаметра d одиничного ГРЕ та маси жорстких робочих елементів (ЖРЕ) також сприяють зростанню показників ступеню зміцнення та глибини її проникнення у матеріал зразка, хоча не так інтенсивно, як при розглянутих попередньо факторах контактування.

Зростання величини l – вільного польоту ГРЕ – призводить до зменшення ступеня та глибини шару зміцнення, що слід пояснити втратою жорсткості одиничного ГРЕ, в зв'язку з чим величина зусилля контактної взаємодії не спроможна подолати нижню межу пластичного деформування матеріалу.

У процесі досліджень перевірявся варіант ПОЗО за умови, якщо до всіх робочих секцій інструмента був під'єднаний електричний струм. В даному випадку у процесі контактування ГРЕ або ЖРЕ інструмента поверхня виробу фактично вражалась лише електродуговими розрядами. Тобто підлягала значному температурному впливу з одночасним очищенням від поверхневих нашарувань, які необхідно видалити. Процес очищення здійснювався ГРЕ секцій, які перебували у безпосередньому контакті з поверхнею.

Такий метод поверхневої обробки є ефективним у випадку очищення литої заготовки від пригару, а поверхня основного металу в майбутньому підлягатиме додатковій ПОЗО, оскільки (враховуючи товщину шару пригару) необхідні якісні показники не отримуватимуться.

З наведених на рис. 1 (для сталі 45) та рис. 2 (для сталі 38ХНЗМФА) графіках залежності ступенів зміцнення від глибини поверхневого шару матеріалу за різних технологічних режимів обробки, конструктивних змін окремих робочих елементів інструмента та матеріалу ГРЕ впливає, що, незалежно від матеріалу зразків, зі зростанням величини натягу ГРЕ та швидкості обертання ДСЩ ступінь зміцнення зростає, асимптотично наближаючись до деякого граничного значення, яке залежить від вихідної твердості матеріалу зразка.

Таблиця 2

Показники степенів та коефіцієнти залежностей впливу технологічних параметрів процесу ПОЗО та різновидів конструкцій ДСЦ на товщину зміцнення поверхневого шару матеріалу

Говщина зміцненого шару	Марка матеріалу, його вихідна поверхнева твердість	b	b _V	b _H	b _I	b _C	b _B	b _I	b _S	b _H
Процес поверхневого зміцнення за умови, що до всіх секцій ДСЦ під'єднаний електричний струм										
h _Z ^I	Сталь 20 (HB 156)	6,17206 × 10 ⁻³	0,38086	0,042966 × lnI	0,47883	0,10344	-0,062578 × lnS	-0,52619	-0,330736 × lnH _{II}	-0,276758 × lnV _ш
	Сталь 45 (HB 179)	6,426778 × 10 ⁻³	0,51640	0,060244 × lnI	0,56066	0,11268	-0,097465 × lnS	-0,58804	-0,414883 × lnH _{II}	-0,318186 × lnV _ш
	Сталь 38ХНЗМФА (HB 221)	6,708455 × 10 ⁻³	0,59227	0,066549 × lnI	0,60212	0,11309	-0,105572 × lnS	-0,61448	-0,460763 × lnH _{II}	-0,320339 × lnV _ш
	Сталь 40X (HB 229)	6,901280 × 10 ⁻³	0,84340	0,078080 × lnI	0,73493	0,12417	-0,110249 × lnS	-0,77072	-0,552594 × lnH _{II}	-0,367125 × lnV _ш
Процес поверхневого зміцнення за умови, що електрострум під'єднаний до частин секцій ДСЦ, які чергуються з секціями очищування (режим термомеханічного оброблення (ТМО))										
h _Z ^I	Сталь 20 (HB 156)	3,088027 × 10 ⁻⁴	1,06628	0,110945 × lnI	0,27068	0,04633	-0,022014 × lnS	-0,66014	-0,260777 × lnH _{II}	-0,243217 × lnV _ш
	Сталь 45 (HB 179)	3,091105 × 10 ⁻⁴	1,06808	0,113380 × lnI	0,27804	0,04904	-0,026682 × lnS	-0,67210	-0,268505 × lnH _{II}	-0,250266 × lnV _ш
	Сталь 38ХНЗМФА (HB 221)	3,096012 × 10 ⁻⁴	1,06884	0,114395 × lnI	0,28117	0,05082	-0,029028 × lnS	-0,67705	-0,271226 × lnH _{II}	-0,256553 × lnV _ш
	Сталь 40X (HB 229)	3,107668 × 10 ⁻⁴	1,06922	0,115084 × lnI	0,28898	0,05327	-0,031216 × lnS	-0,68211	-0,279894 × lnH _{II}	-0,258084 × lnV _ш
Процес поверхневого зміцнення за умови, що всі секції ДСЦ ізолювані від контакту з електричним струмом (режим механічного оброблення)										
h _Z ^δ	Сталь 20 (HB 156)	2,638824 × 10 ⁻⁴	0,47066	0,652207 × lnV _ш	0	0,08917	-0,071984 × lnS	-0,23088	-0,580446 × lnH _{II}	-0,17066 × lnV _ш
	Сталь 45 (HB 179)	6,426778 × 10 ⁻⁴	0,48903	0,677706 × lnV _ш	0	0,09441	-0,075092 × lnS	-0,26035	-0,599060 × lnH _{II}	-0,19614 × lnV _ш
	Сталь 38ХНЗМФА (HB 221)	6,708455 × 10 ⁻⁵	0,72044	0,438848 × lnV _ш	0	0,11062	-0,628978 × lnS	-0,09334	-0,312090 × lnH _{II}	-0,08455 × lnV _ш
	Сталь 40X (HB 229)	6,901280 × 10 ⁻⁵	0,76206	0,470777 × lnV _ш	0	0,11382	-0,655029 × lnS	-0,10269	-0,317844 × lnH _{II}	-0,09878 × lnV _ш

Причина такого зростання вочевидь криється в зростанні контактних напружень у місцях контактування як окремих (одиночних) ГРЕ, так і ГРЕ, сформованих у секції (середній коефіцієнт заповнення $k_z = 0,13$ [11]), викликаних як зусиллям динамічної взаємодії від H_H , так і їх періодичності (частоти) контактування. Підвищення контактних напружень у матеріалі поверхневого шару зразків призводить до зростання швидкості поширення дислокацій, що і забезпечує в кінцевому результаті більш інтенсивне зміцнення.

У процесі ТМО (рис. 1-3) та процесі лише механічного контактування (рис. 4) слід констатувати про значне зростання зміцненого шару внаслідок теплової дії електродугового розряду, порівнюючи з результатами механічного зміцнення. А загалом для двох наведених методів ПОЗО фактори процесу (кожен з властивою йому інтенсивністю) чинять аналогічний вплив на зміни товщини зміцненого шару. Так, наприклад, із зростанням подачі S зменшується час та область сконцентрованого впливу контактуючих елементів на поверхню зразка, що призводить до зменшення товщини зміцненого поверхневого шару незалежно від матеріалу зразка та його вихідної твердості.

Суттєві зміни глибини зміцненого шару відбуваються за умови одночасної дії дугового розряду (при $I = 70...120$ А), натягу ГРЕ (в межах $H_H = (3,0...4,5) \cdot 10^{-3}$ м) та кількості струмопровідних секцій інструмента ($C_I = 4...5$ шт.). Для наведених на графіках матеріалів зразків (рис. 3) при поверхневій вихідній мікротвердості сталі 45 в $H_\mu = 1430$ МПа (HB 179) отримано на глибині 870 мкм мікротвердість величиною $H_\mu = 7200$ МПа, а максимальна глибина фіксованих змін мікротвердості (порівняно з серцевиною матеріалу) досягає 2200 мкм. Для зразків із сталі 38ХНЗМФА з вихідною мікротвердістю поверхні $H_\mu = 1660$ МПа на глибині в 580 мкм отримано

$H_{\mu} = 8400$ МПа. Максимально фіксована товщина зміцненого шару даного матеріалу становила 1970 мкм.

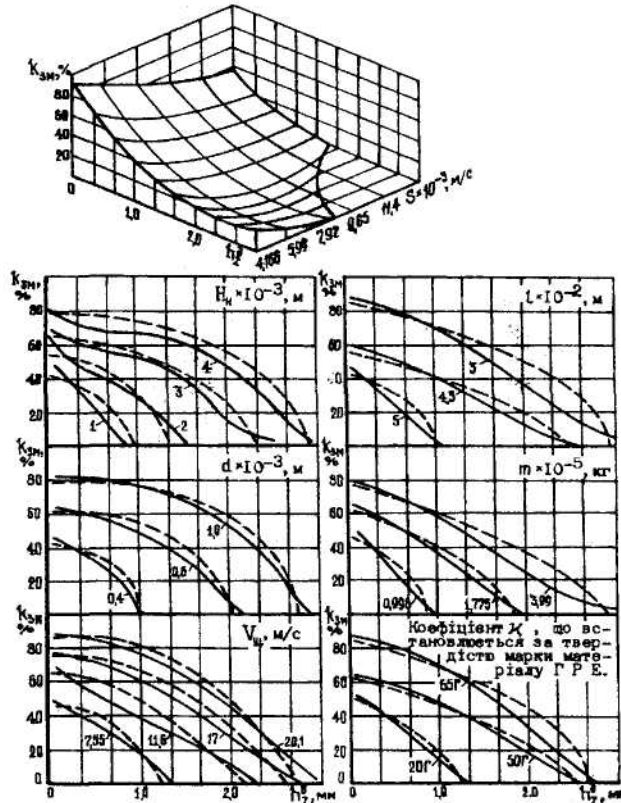


Рис. 1. Вплив технологічних режимів ТМО в режимі механічної взаємодії ДСЦ на ступінь зміцнення поверхневого шару матеріалу зразка, виготовленого зі сталі 45

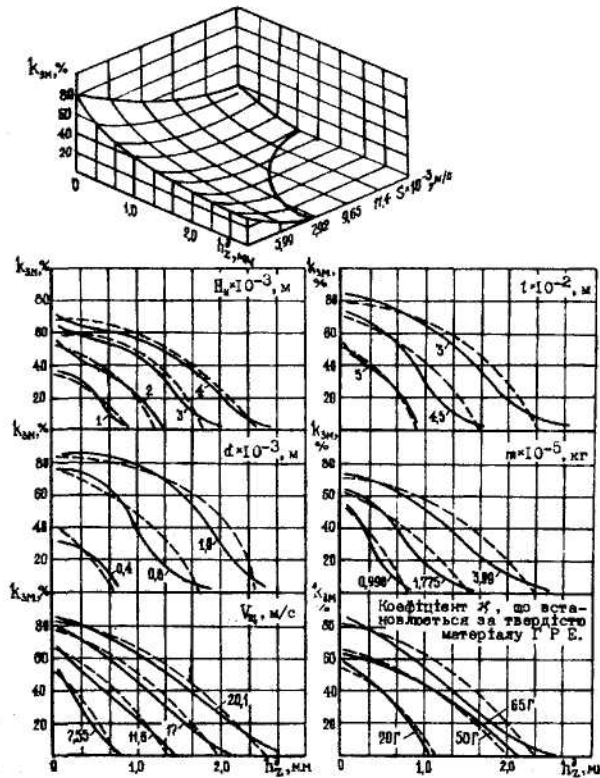


Рис. 2. Вплив технологічних режимів ТМО в режимі механічної взаємодії ДСЦ на ступінь зміцнення поверхневого шару матеріалу зразка, виготовленого зі сталі 38ХНЗМФА

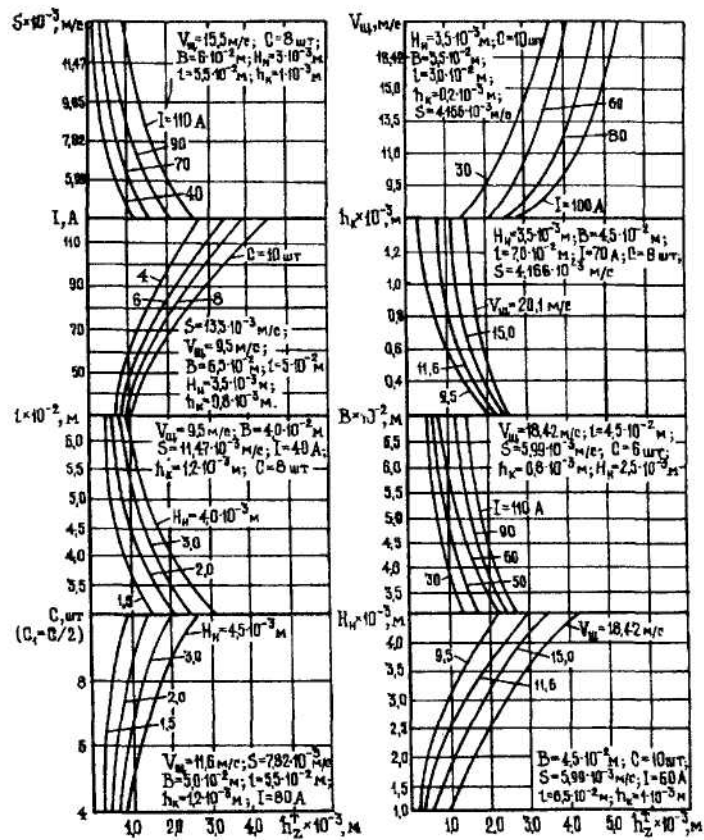


Рис. 3. Графіки залежностей від технологічних режимів ТМО товщини зміцненого шару основного металу зразка, виготовленого зі сталі 45

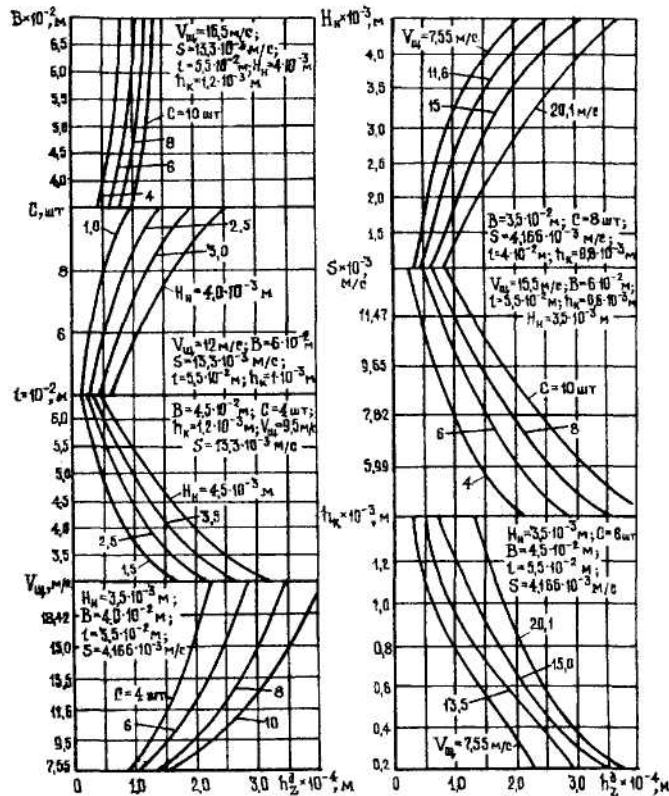


Рис. 4. Графіки впливу технологічних режимів ТМО на товщину зміцненого поверхневого шару зразків із матеріалу сталі 45 внаслідок лише динамічного контактування секції ГРЕ ДСІІ

У процесі лише механічного контактування при наведених вище факторах ПОЗО глибина зміцненого шару та його твердість мають значно менші показники (рис. 4). Що, однак, не заперечує ефективності та прийнятливості такого методу поверхневого зміцнення механічним інструментом з ГРЕ.

Висновки

1. В результаті виконаних досліджень встановлено, що на параметри зміцнення поверхневого шару при ТМО суттєво впливають режимні фактори оброблення.

2. Незалежно від марок досліджених сталей найбільший вплив на показники зміцнення (ступінь та глибину) має швидкість обертання інструмента $v_{\text{ш}}$ і сила струму I у мережі.

Для забезпечення високої якості поверхні після ПОЗО ТМО рекомендовано застосування таких режимів: швидкість щітки $v_{\text{щ}} = 15\text{--}25$ м/с, поздовжня подача $S = 2\text{--}5$ м/хв., сила струму $I = 50\text{--}70$ А, глибина натягу (різання) $t = 0,02\text{--}0,01$ мм.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Пуховский Е.С., Гавриш А.П., Грищенко Е.Ю. Обработка высокопрочных материалов. – К.: Техніка, 1983. – 134 с.
2. Кравченко В.Н., Литвиняк Я.Н., Перепичко Е.В. Исследование процесса обработки поверхностей вращающимися металлическими щетками // Оптимизация производственных процессов и технический контроль в машиностроении // Вестник Львовского политехн. ин-та. – 1983. – С. 43.
3. Кургузов Ю.И., Патшев Д.Д. Технологическое обеспечение качества поверхности при упрочнении механическими щетками // Вестник машиностроения. – № 4. – 1986. – С. 54–56.
4. Патшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.
5. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 207 с.
6. Кухтик Т.В., Кухтик В.С., Гинкул С.П. Управление проблемами коробления корпусных жестких деталей при механической обработке в ГПС // Депонир. научн. р-ты. – ВИНТИ. – № 1. – 1987. – 173 с.
7. Лившиц Л.С., Хакимов А.П.. Металловедение сварки и термическая обработка стальных изделий. – М.: Машиностроение, 1989. – 336 с.
8. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 480 с.
9. Душинський В.В. Основи наукових досліджень: Теорія та практикум з прогр. забезпечення. – К.: Вища школа, 2000. – 400 с.
10. Положий Г.Н. Уравнения математической физики. – М.: Высшая школа, 1989. – 560 с.
11. Гавриш А.П., Киричок П.О., Підберезний М.П. Зміцнення поверхонь деталей машин і механізмів. – К.: Наукова думка, 1995. – 173 с.

ГАВРИШ Олег Анатолійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, начальник науково-дослідного і проектно-конструкторського бюро державного підприємства “Науково-технічний центр артилерійсько-стрілецького озброєння України”.

Наукові інтереси:

– фінішні процеси обробки деталей у машинобудуванні.

КИРИЧОК Петро Олексійович – доктор технічних наук, професор, декан поліграфічного факультету Національного технічного університету України “КПІ”.

Наукові інтереси:

– оздоблювально-зміцнююча обробка матеріалів.

Подано 28.03.2003