

<https://doi.org/10.15407/plit2024.01.058>

УДК 669:621.039; 669:621.039.6

М.М. Ямшинський, д-р. техн. наук, професор, зав. кафедри;
e-mail: yamshinskiy@ukr.net; ORCID 0000-0002-2293-2939, Researcher ID:
I-4267-2017, Scopus Author ID: 6508061815

Є.Г. Биба, канд. техн. наук, доцент; e-mail: byba.evgen@gmail.com;
ORCID 0000-0002-1696-300X, Researcher ID: AAK-1757-2020, Scopus Author ID:
57212388833

А.В. Мініцький, д-р. техн. наук, професор; e-mail: aminitsky@gmail.com;
ORCID 0000-0001-5767-4071, Researcher ID: AAK-1245-2020, Scopus Author ID:
8326737200

І.В. Лук'яненко, канд. техн. наук, доцент; e-mail: lukianenkoiv@gmail.com;
ORCID 0000-0002-1043-9688, Researcher ID: J-7294-2017,
Scopus Author ID: 57224367323

***С.П. Бісик**, д-р. техн. наук, професор, начальник науково-випробувального
відділу Національного університету оборони України;
e-mail: sergey-new@ukr.net; ORCID 0000-0002-5009-2113, Researcher ID :
AAD-2824-2019, Scopus Author ID: 57214917155

***В.В. Гринюк**, начальник кафедри Національного університету оборони
України; e-mail: vova_kira_alla@ukr.net

Б.В. Кивгило, аспірант; e-mail: kyvhylo.bohdan@gmail.com;
ORCID 0000-0001-5890-9020

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

*Національний університет оборони України (Київ, Україна)

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ, СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОРИСТИХ КАРКАСІВ

Відходи машинобудівних підприємств у вигляді стружки чорних і кольорових металів можуть мати негативний вплив на довкілля. Серед можливих екологічних наслідків від відходів металокордуну та стружки такі: забруднення повітря, утворення пилу, який містить шкідливі хімічні речовини, як-от свинець, кадмій, хром та ін. токсичні метали, забруднення ґрунту, води. Усі ці фактори спричиняють загрозу здоров'ю людей і тварин. Установлено, що оброблення металевої стружки 0, 1 нормальним розчином соляної кислоти в спирті забезпечує видалення з її поверхні шкідливих домішок (алюміній, цинк, свинець), які входять до складу мастильно-

охладжувальних рідин та зменшують вміст сірки на поверхні з 0,146 до 0,089 %. Разом із цим соляна кислота активує поверхню сталевих стружки за рахунок переведення оксидів або гідроксидів заліза в хлориди заліза, що, у свою чергу, сприяє процесам змочування під час інфільтрації рідкого алюмінієвого розплаву. Відпал при температурі 700 °С в середовищі гостро осушеного водню забезпечує підвищення пластичних властивостей металевих стружки та зменшення внутрішніх напружень стиску з -450 МПа до -112 МПа. Проведення відпалу у відновлювальному середовищі зменшує кількість оксиду заліза на поверхні металевих стружки з 11,0 % до 7,0 %, що додатково підвищує її пластичні властивості. Дослідження процесу формування пористого каркаса показало, що при тисках пресування 50–150 МПа забезпечується пористість на рівні 30–50 %. Підвищення тиску пресування є недоцільним через збільшення кількості закритих пор, які перешкоджають процесу інфільтрації рідкого розплаву. За результатами багаторазового моделювання встановлено, що енергопоглинаючі елементи, сформовані з металевих стружки після відпалу, мають вищі фізико-механічні характеристики та енергію поглинання удару порівняно з металевим каркасом, виготовленим із невідпаленої стружки.

Ключові слова: металева стружка, структура, пористість, прогнозування, технологічні процеси, геометричні розміри поруватих каналів.

Вступ.

Ефективність виробництва в Україні в сучасних економічних умовах суттєво залежить від раціонального підбору дешевих матеріалів і застосування ресурсозберігаючих технологій. Конкурентоспроможність промислових підприємств формується за рахунок регулювання собівартості продукції. Сучасні технологічні інновації дозволяють розглядати вторинні промислові відходи як додаткове джерело сировини і матеріалів. Аналіз машинобудівного виробництва показує, що воно супроводжується накопиченням значної кількості відходів [1–4].

У процесі виробничої діяльності машинобудівних підприємств утворюється велика кількість різноманітних відходів, багато з яких є цінною вторинною сировиною. Вирішення завдань ресурсозбереження, яке вимагає включення відходів у технологічний цикл підприємства, дає змогу збільшити рентабельність виробництва, знизити екологічне навантаження на навколишнє середовище, що актуально в умовах виснаження запасів природних ресурсів, особливо металів і сплавів, які широко використовують у подальшому виробництві.

Цінним видом відходів є металева стружка, що утворюється під час механічного оброблення сталевих виробів у великих обсягах. На підприємствах середньої величини її кількість може становити близько 18–20 тис. т. на рік [5].

Ефективна утилізація металевих стружки (рис. 1.), що утворюється під час механічного оброблення, становить для машинобудівних підприємств серйозну проблему.

Зазвичай стружка забруднена всілякими домішками: мастильно-охолоджувальною рідиною (далі — МОР), олією, вологою, кварцовим піском, шламом, сміттям, що ускладнює проблему її перероблення на місці утворення. Під час зберігання металевих стружки інтенсивно іржавіє та злежується, у великих обсягах відбуваються хімічні процеси, пов'язані з окисненням стружки, випаровуванням МОР і забрудненням атмосфери [4, 5].

Загальна забрудненість стружки МОР вологою, олією і піском становить до 15 %, що знижує її металургійну цінність.

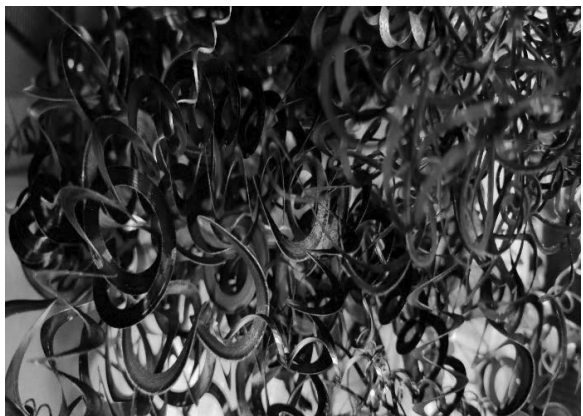


Рис. 1. Загальний вигляд токарної зливної стружки

Водночас стружка містить такі елементи, як кремній, хром, нікель, мідь, ванадій, титан, молибден, що робить її привабливою для подальшого використання як армуючої фази.

Можливість прямого використання у виробництві підприємств відходів у вигляді металевої стружки обмежена через наявність перелічених забруднень. Крім того, варто відзначити складність завантаження стружки в плавильні агрегати та підвищення часу плавлення [6].

Найбільш ефективний комплексний підхід до вирішення проблеми полягає, по-перше, у цілеспрямованому формуванні властивостей стружки, що утворюється в умовах виробництва, організації роздільного збирання стружки з різних металів, і, по-друге, обладнанні механічних виробництв технологічними лініями перероблення та брикетування стружки.

До складу стружкових відходів, крім металевої складової, входять МОР, що мають значний вплив на фізико-хімічні й технологічні властивості стружки. До найбільш уживаних МОР належать: водні розчини мінеральних електролітів, емульсії, розчини мила, мінеральні, тваринні та рослинні олії з добавками фосфору, сірки та хлору (сульфозфрезоли), гас і розчини поверхнево-активних речовин (ПАР) у гасі, олії та емульсії з добавками твердих змащувальних речовин (графіту, парафіну, воску тощо). Сучасні емульсійні МОР є складними системами, що включають антифрикційні та інгібітори корозії (нітрит натрію тощо), емульгатори, які сприяють тривалому зберіганню емульсії та запобігають її розділенню на воду й олію (желатин), бактерицидні добавки тощо. Оптимальна концентрація водної МОР залежить від фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, здійснюваної операції, режимів обробки і коливається від 1 до 10 % [2, 4].

МОР відводять теплоту у зовнішнє середовище, охолоджуючи стружку, а в низці випадків запобігають процесам знеміцнення й окиснення металу, а також фазовим перетворенням. Молекули рідин і особливо ПАР адсорбуються на поверхнях мікротріщин стружки. Основою емульсії служить вода, в якій у вигляді мікрокрапель (1–30 мкм) розподілена олія. Мікрокраплі олії в системі стабілізовані ПАР. ПАР підвищують змочувальні властивості рідини. Для активізації мастил до них додають активні речовини – фосфор, сірку, хлор. Під впливом високих температур і тисків у процесі різання ці речовини утворюють із металом фосфіди, сульфіди, хлориди.

Хімічний аналіз стружки [2] додатково показує вміст до 2,0 % кисню. Крім того, наявність вуглецю у складі стружки дозволяє встановити певну закономірність окиснення: найбільше окиснення має низьковуглецева сталь, а найменше сталь 45. Також у роботі відзначено, що зі зменшенням розмірів стружки підвищується швидкість окиснення. Фазовий склад стружки показує наявність оксиду заліза Fe_3O_4 до 5,0 %.

Завершальною операцією переробки стружки є брикетування. Економічний ефект тут визначається зменшенням під час пресування на порядок контактної поверхні стружки та зниженням окиснення порівняно з використанням сипучої стружки.

Одним з основних показників рівня сучасних технологій є ресурсозбереження. Використання металовідходів дозволяє істотно впливати на вартість кінцевої продукції. У наявних технологіях металообробки відходами виробництва є: металева стружка, обрізь заготовок, шлами шліфувальних верстатів [2, 5]. Відходи — цінна вторинна сировина, і доцільність повернення їх у переробку не викликає сумнівів. Значну частку у відходах металообробки становить стружка чорних і кольорових металів. Прогресивними технологіями переробки стружки є пакетування, брикетування та переробка стружки в порошок для порошкової металургії [5, 6].

У промисловості отримали поширення два методи окусовування стружки: брикетування і пакетування. Для брикетування рекомендується використовувати тільки подрібнену стружку. Другим методом є її пакетування, але пакетувати спіралеподібну сталеву стружку не вдається, оскільки при великих зусиллях пресування вона руйнується, а при малих — пакети розсипаються. Тому пакетування сталевих стружки необхідно проводити у відпаленому стані [7, 8].

Для високопористих матеріалів, що їх використовують як армуючу фазу (металева стружка), визначальною властивістю є здатність до подальшої інфільтрації рідким металом. Так, якість і проникність матеріалів буде визначати лише зовнішня наскрізна пористість. Вона визначатиме спроможність армуючої фази на швидкість інфільтрації, тобто кількість речовини, що проходить крізь неї. Найбільший вплив на цю властивість мають характеристики металевої стружки, а також метод її отримання.

Існує багато матеріалів, які застосовують для виготовлення поруватих заготовок. Вибір того чи того матеріалу зумовлений передусім вимогами до його застосування та економічним фактором. Пористість визначається розмірами, формою та морфологією поверхні матеріалу та іншими характеристиками, які залежать від методів отримання виробу.

Статичне пресування досить поширене, оскільки воно забезпечує отримання деталей, які майже не піддаються механічному обробленню. Його застосовують для виробництва простих за формою і невеликих за розмірами виробів, наприклад, дисків або пластин. Для досягнення достатньої пористості отримуваних виробів важливим є прикладений тиск, який має бути в межах до 200 МПа. Таким чином може бути отримана пористість до 60 % [9, 10].

Сучасна промисловість потребує нових конструкційних та функціональних матеріалів, у тому числі композиційних металевих матеріалів із залученням методів формування композитів шляхом інфільтрації пористих каркасів металевими розплавами.

Метою роботи є розроблення технології виготовлення металевих шаруватих композитів, що являють собою матрицю зі стружки з відходів металообробки для подальшої інфільтрації рідким розплавом алюмінію.

Роботу виконано за договором №ДЗ/149-2023 «Розроблення технології виготовлення високоефективних елементів протимінного захисту з відходів металообробки» в межах виконання державного замовлення. Номер державної реєстрації — 0123U104371.

Постановка задачі.

Однією з основних вимог до виробів є рівномірний розподіл щільності по об'єму отриманої заготовки. Суттєвий вплив на розподіл густини мають геометричні розміри металевої стружки, фізико-механічні характеристики, габарити кінцевого виробу та ін. фактори.

У роботі поставлено такі задачі досліджень:

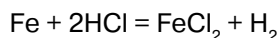
1) визначити послідовність та параметри технологічних операцій підготовки металевої стружки для отримання армуючої складової заданого розміру та хімічної чистоти з необхідними фізичними й технологічними характеристиками;

2) дослідити процеси формування, структури та властивостей заготовок із заданою пористістю (35–50 %) та геометричними розмірами порових каналів каркаса з частинок металевої стружки.

Результати дослідження.

Відповідно до ДСТУ 4121-2002 «Метали чорні вторинні», в роботі використано вихідний матеріал низьколегованої сталеві стружки Вид №22 Стружка сталеві №1 з довжиною витка не більше 200 мм. За допомогою механічної гільйотини стружку подрібнювали до розмірів 10–15 мм. Подрібнену стружку низьковуглецевої сталі (рис. 2, а) використовували для подальших досліджень. Загальний вигляд металевої стружки після відпау в силітовій трубчастій печі (рис. 2, б).

Щоб отримати суцільне з'єднання між армуючою фазою та металом основи, на його поверхні необхідно утворити тонкий шар хлориду заліза. Одним із можливих методів є реакція заліза з хлорними сполуками або з розчинами хлоридів. При взаємодії соляної кислоти зі стружкою із вуглецевої сталі відбувається реакція, унаслідок якої на поверхні заліза утворюється хлорид заліза (II), який у подальшому слугує своєрідним флюсом:



Для формування шару хлориду на поверхні металевої стружки її витримували в заздалегідь приготованому розчині протягом 15 хв.

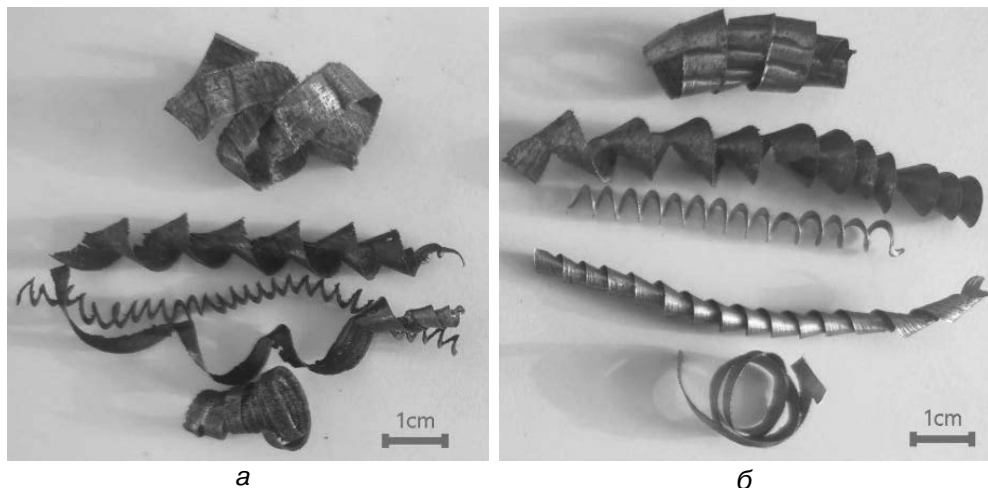
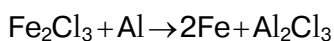
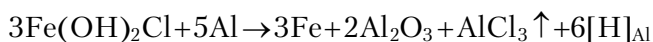


Рис. 2. Загальний вигляд металевої стружки: а — до відпалу; б — після відпалу

Зазвичай сталева стружка є матеріалом, дуже забрудненим оксидними та комплексними домішками: FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, FeOOH та декількома іншими (не більше 3 %) [12]. Ці домішки суттєво погіршують процеси змочування часточок стружки розплавами, у т. ч. алюмінію. У такому разі потрібен флюс, або іншими словами, каталізатор змочування поверхні. З цією метою використано соляну кислоту, перебуваючи в якій, указані вище оксидно-гідроксидні плівки на поверхні стружки в результаті хімічної взаємодії перетворилися на нові сполуки — FeCl_2 , FeCl_3 ; можлива також поява оксихлоридів FeOHCl , $\text{Fe}(\text{OH})_2\text{Cl}$, FeOHCl_2 .

Відомо, що оксидна плівка, яка завжди присутня на поверхні алюмінієвого розплаву, захищає його від взаємодії з атмосферою. На межі стружка-розплав вона буде забезпечувати захисну дію та протидіяти змочуванню.

Після оброблення металевої стружки 0,1 нормальним розчином соляної кислоти реакції можуть бути такі:



Очевидно, що в результаті другої реакції утворений оксид алюмінію буде протидіяти змочуванню, а водень додатково розчинятиметься у розплаві та утворюватиме газову пористість.

У розплаві, який контактує зі стружкою протягом кількох секунд, поки не утворюється тверда кірка; на першому місці стоїть реакція хлориду заліза з алюмінієм: її результатом є два процеси — відновлення заліза та утворення хлориду алюмінію. У результаті реакції оксихлориду заліза з алюмінієм мають відбутися такі процеси: відновлення заліза, утворення хлориду алюмінію, утворення оксиду алюмінію, розчинення водню в алюмінії. Швидка динаміка взаємодії показує на користь простішої реакції, яка має менше стадій.

Важливою особливістю є також те, що хлорид алюмінію (в реакціях показано як газоподібний продукт) має температуру сублімації близько 180°C , тобто в розплаві він буде утворюватися в газоподібному стані. Не виключено, що певний час (декілька секунд після утворення) він буде перебувати в рідкому стані на поверхні стружки. У будь-якому разі ця поверхня звільняється як від оксидних плівок заліза, так і від можливих оксидних плівок алюмінію, що підтверджується малим крайовим кутом змочування заліза алюмінієм. Газоподібний хлорид алюмінію повинен мати час на видалення з розплаву, тобто потрібна ізотермічна витримка.

Нові литі матеріали

Таким чином, попереднє оброблення металевої стружки 0,1 нормальним розчином соляної кислоти в спирті сприяє активації поверхні сталевих стружки за рахунок переведення оксидів або гідроксидів заліза в хлориди.

Автори робіт [1–3, 7] відзначають, що стружка перебуває в напруженому стані і це не дозволяє повноцінно провести процеси брикетування. У такому випадку необхідно використовувати пластифікатор. Оскільки в подальшому буде використовуватися інфільтрація рідкого розплаву, то наявність пластифікатора неприпустима.

З метою підвищення пластичних властивостей металевої стружки в роботі запропоновано використовувати відпал при температурі 700 °С в середовищі гостроосушеного водню. З урахуванням того, що товщина металевої стружки не перевищує 1 мм, час витримування становив 30 хв.

Визначення хімічного складу металевої стружки здійснювали до та після попередньої підготовки. Стружка має досить високу розвинену (питому) поверхню, тому хімічний склад визначали в 5 точках. Усереднений хімічний склад наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад металевої стружки

Атомний номер та назва елемента	Масовий вміст елемента, %			
	До відпалу	Після відпалу	До відпалу з обробленням 0,1 нормальним розчином соляної кислоти в спирті	Після відпалу та оброблення в 0,1 нормальному розчині соляної кислоти в спирті
13 Al	0,198	–	–	–
14 Si	0,883	0,916	0,417	0,483
16 S	0,146	0,089	0,075	0,053
17 Cl	–	–	4,018	2,280
24 Cr	0,095	0,185	0,089	0,270
25 Mn	0,553	0,619	0,486	0,606
26 Fe	97,751	98,003	94,742	96,151
29 Cu	0,313	0,187	0,173	0,155
30 Zn	0,044	–	–	–
82 Pb	0,017	–	–	–

Аналіз результатів табл. 1 показує наявність хімічних елементів Zn та Pb, які потрапляють з МОР. Крім того, відзначається підвищений вміст S, що свідчить про забрудненість поверхні металевої стружки сульфідами різних металів. Після відпалу при температурі 700 °С у середовище гостроосушеного водню вміст S знижується до 0,089 %, а легкоплавкі домішки Zn та Pb зникають.

Для підвищення ефекту змочуваності алюмінієвим розплавом здійснювали промивку металевої стружки в 0,1 нормальний розчин соляної кислоти в спирті (табл. 1).

Встановлено, що на поверхні металевої стружки спостерігається суттєве зниження шкідливих домішок від МОР та підвищується вміст хлору, що свідчить про більш активну взаємодію не тільки з основою стружки, але й з додатковими хімічними елементами МОР, які також утворюють хлориди, що сприятиме процесу змочування алюмінієвим розплавом.

Для підтвердження гіпотези щодо очищення поверхні металевої стружки проведено комплексне очищення в 0,1 нормальному розчині соляної кислоти в спирті після відновлюваного відпалу при температурі 700 °С. Встановлено, що комплексне

сна підготовка вихідних матеріалів сприяє суттєвому покращенню стану поверхні: видаленню шкідливих домішок від МОР; підвищенню пластичності; утворенню на поверхні хлоридів заліза, які своєю чергою мають покращити процеси змочування під час інфільтрації рідкого алюмінієвого розплаву.

Геометричні розміри порових каналів залежно від тиску пресування наведено в табл. 2.

Таблиця 2
Геометричні розміри порових каналів металевої стружки до та після відпалу залежно від тиску формування

До відпалу		Після відпалу	
Тиск формування стружки, МПа	Лінійні розміри порових каналів $L_{сер}$, мм	Тиск формування стружки, МПа	Лінійні розміри порових каналів $L_{сер}$, мм
20	2,75	20	1,51
50	1,66	50	1,42
100	1,15	100	1,37
150	0,94	150	1,14

З підвищенням тиску формування кількість та лінійні розміри порових каналів металевої стружки до відпалу зменшуються від (у середньому) 2,75 мм до 0,92 мм та після відпалу зменшуються від (у середньому) 1,51 мм до 1,06 мм.

З аналізу отриманих даних встановлено, що найкращі показники лінійних розмірів порових каналів досягаються при тиску пресування 50–150 МПа, що підтверджується результатами експериментальних досліджень із визначення пористості (рис. 3) та попередніми дослідженнями авторів [13].

Подальше підвищення тиску до 200 МПа і вище є недоцільним, оскільки призводить до зниження пористості до менше 40 %, що збільшує кількість закритих пор і унеможлиблює в подальшому процеси інфільтрації рідкого розплаву.

Для оцінки міцнісних характеристик армуючої складової було визначено межу міцності на стиск при різних тисках пресування.

Установлено, що металева стружка після відпалу набуває пластичних властивостей, які покращують якість пресовок, зберігаються геометричні розміри при менших тисках пресування.

Таким чином, оптимальний тиск пресування армуючої складової становить 50–150 МПа, що додатково підтверджується достатньою межею міцності на стиск (150 МПа) (рис. 3, б). Збільшення тиску пресування понад 150 МПа призводить до закриття пор, що зменшує ймовірність інфільтрації рідким розплавом.

Щоб підтвердити наявність оксидів заліза на поверхні металевої стружки було проведено кількісний та якісний рентгенофазовий аналіз. Результати рентгенофазового аналізу представлено на рис. 4 і в табл. 3.

Після відпалу у відновлювальному середовищі кількість оксиду заліза на поверхні металевої стружки зменшується до 7,0 %, що позитивно впливає на пластичні властивості армуючої складової.

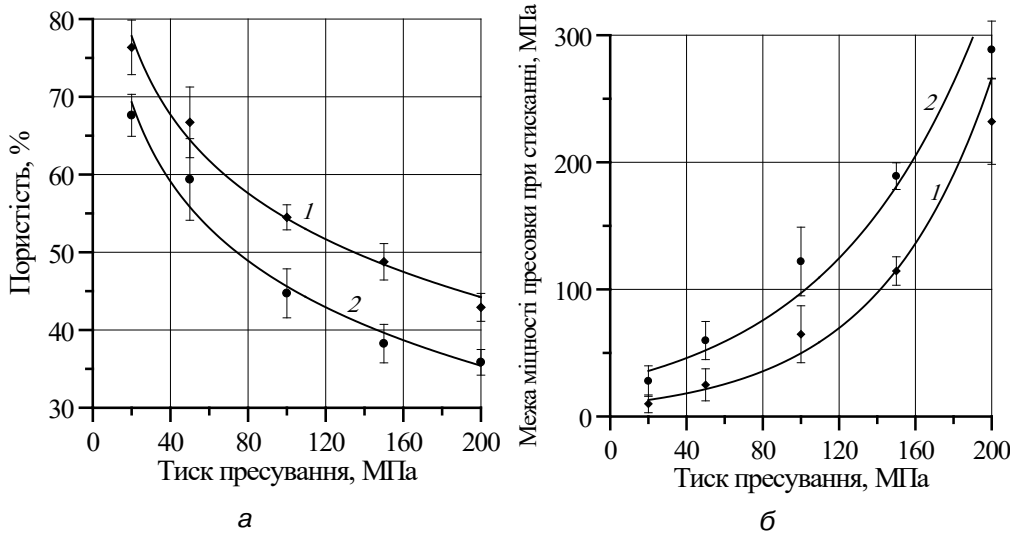


Рис. 3. Механічні властивості пресовок: а — залежність пористості від тиску пресування; б — залежність межі міцності пресовок залежно від тиску пресування; 1 — до відпалу; 2 — після відпалу

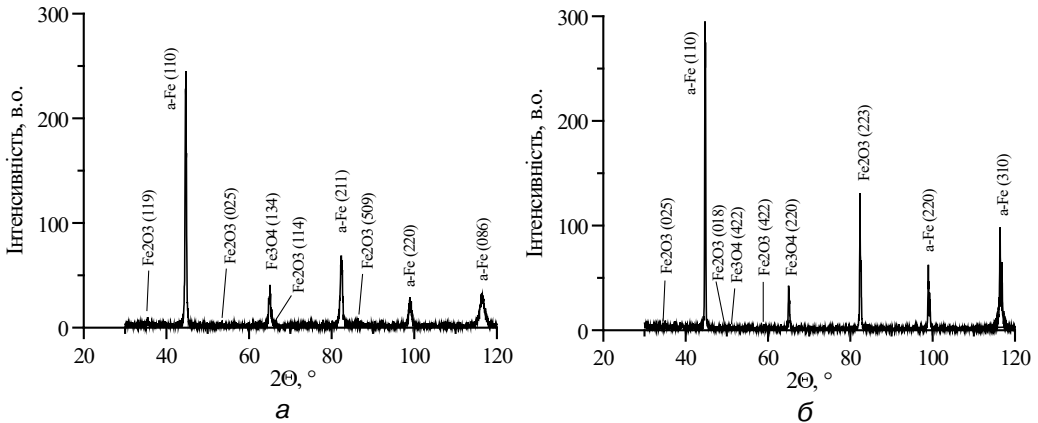


Рис. 4. Рентгенограми досліджуваних зразків металевої стружки: а — до відпалу; б — після відпалу

Одним із параметрів, що визначає процеси деформації сталевих стружок, є залишкові макронапруження [13]. Напружено-деформований стан армуючої складової впливає на ступінь пластичної деформації пористого каркаса. Для визначення залишкових макронапружень було використано метод $\sin^2\psi$ на дифрактометрі Rigaku Ultima IV.

У процесі механічного оброблення в металевій стружці виникають залишкові напруження. Причиною виникнення залишкових напружень є неоднорідність деформованого стану твердого тіла через різноманітні зміни в різних місцях його довжини чи об'єму.

У результаті окиснення залишкові напруження можуть бути шкідливими і, навпаки, корисними (підвищують межу пружності системи). Шкідливі залишкові напруження вважаються прихованим дефектом.

Підвищене зростання швидкості деформування (різання металу інструментом) сприяє посиленню залишкових напружень, і, навпаки, чим пластичнішим є стан матеріалу, тим швидше і більшою мірою знімається залишкове напруження.

Зменшення залишкових напружень з -450 МПа до -112 МПа підтверджується відпалом, який сприяє зменшенню неоднорідності деформованого стану.

Основними проблемами при формуванні відходів металообробки є складність

Результати кількісного рентгенофазового аналізу та параметрів кристалічної ґратки

Зразок	Назва фази	Вміст, ваг. %	Розмір кристалітів, Å	Мікронапруження, %
Металева стружка до відпалу	α -Fe	89,0 (± 6)	280 (± 41)	0,25 ($\pm 0,1$)
	Fe_3O_4	10,0 (± 2)	38 (± 8)	1,8 ($\pm 0,3$)
	Fe_2O_3	1,0 ($\pm 0,5$)	121 (± 3)	2,9 ($\pm 1,5$)
Металева стружка після відпалу	α -Fe	89,0 (± 8)	460 (± 83)	0,04 ($\pm 0,7$)
	Fe_3O_4	6,0 (± 3)	28,59 (± 8)	0,83 (± 1)
	Fe_2O_3	1,0 ($\pm 0,5$)	5,7 (± 2)	2,1 (± 2)

деформації стружки через неоднорідний хімічний склад та домішки різних металів, що перешкоджає отриманню однорідного каркаса. Проведення попередніх операцій очищення стружки та її відпалу дозволяє збільшити пластичність металу та покращити ущільнення пресовок.

Результати пресування стружки показали, що в діапазоні тисків 50–150 МПа утворюється пористість в межах від 70 до 35 % (рис. 3, а). Слід зазначити, що навіть при значних тисках залишається досить велика пористість пресовок. Це зумовлено тим, що частинки стружки мають неізотричну форму та низьку схильність до структурної деформації на стадії переукладання, що визначає низьке координаційне число таких частинок і, відповідно, зменшення кількості контактів. За геометричними розмірами дослідних пористих каркасів було створено скінченну елементну модель (рис. 5).

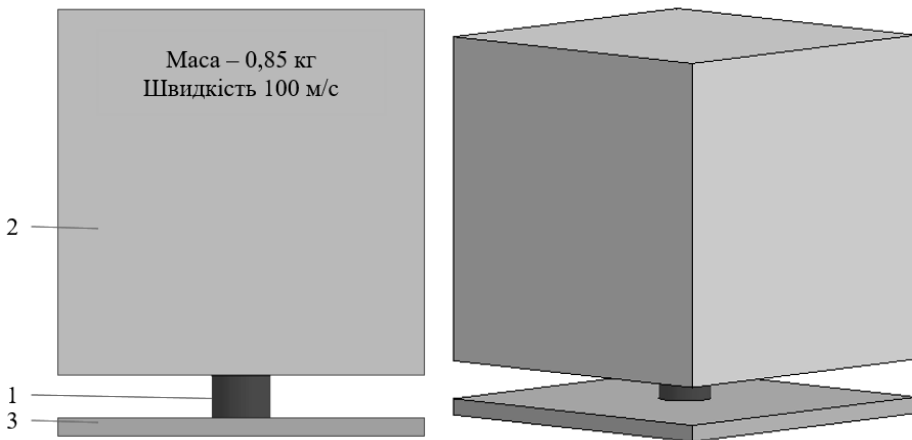


Рис. 5. Скінченно-елементна модель об'єкту дослідження: а — вигляд з боку; б — загальний вигляд; 1 — енергопоглинаючий елемент; 2 — падаюча маса (0,85 кг); 3 — наковальня

На цьому етапі дослідження розроблено чисельну модель, підхід до побудови якої та методологія ідентифікації фізико-термомеханічних властивостей матеріалів ґрунтується на даних робіт [14–17].

Параметри енергопоглинаючого елемента (ЕПЕ) задано відповідно до варіанта розрахунку (табл. 4).

У подальшому змодельовано процес руйнування пористого каркаса при швидкості удару падаючої маси 100 м/с. Відповідно, наковальня та падаюча маса являють собою абсолютно жорсткі тіла, що не мають деформацій.

Скінченно-елементна модель утворена чотиривузловими об'ємними елементами.

Об'єктом моделювання обрано броньовий енергопоглинаючий елемент, отриманий при різних режимах пресування зі стружкою без відпалу та з відпалом.

Таблиця 4

Фізико-механічні характеристики пресовок

№ варіанта моделювання	Умовна густина, кг/м³	Фізико-механічні характеристики			
		Межа міцності пресовки при стисканні, σ, МПа	Модуль Юнга, Ä, ГПа	Відносне видовження, δ, %	Коефіцієнт Пуассона, ν
Стружка до відпалу					
1.	1843,33	9,9	1,2	0,32	0,2
2.	2596,45	24,9	3,2	0,45	0,27
3.	3549,63	64,7	8,7	0,9	0,27
4.	3995,75	114,5	14,56	1,32	0,27
5.	4453,31	209,0	20,45	1,85	0,27
Стружка після відпалу					
1.	2526,67	25,9	1,8	0,36	0,27
2.	3169,47	59,7	4,1	0,51	
3.	4312,63	139,3	14,9	1,21	
4.	4815,96	189,1	18,5	1,58	
5.	5004,07	288,6	26,3	2,15	

Фізико-механічні властивості енергопоглинаючих елементів для різних варіантів оброблення наведено. Габаритні розміри енергопоглинаючих елементів при моделюванні стновлять: діаметр — 16 мм, висота — 11,5 мм.

За результатами моделювання розраховано енергію поглинання для пресовок із різною пористістю рис. 6. Установлено, що відпал сприяє покращенню пластичних властивостей пористого каркаса і для максимального тиску пресування 200 МПа становить 823 Дж та 1077 Дж відповідно при часі руйнування 100 мкс.

Таким чином, результати моделювання підтверджують доцільність проведення відпалу в середовищі гостро осушеного водню.

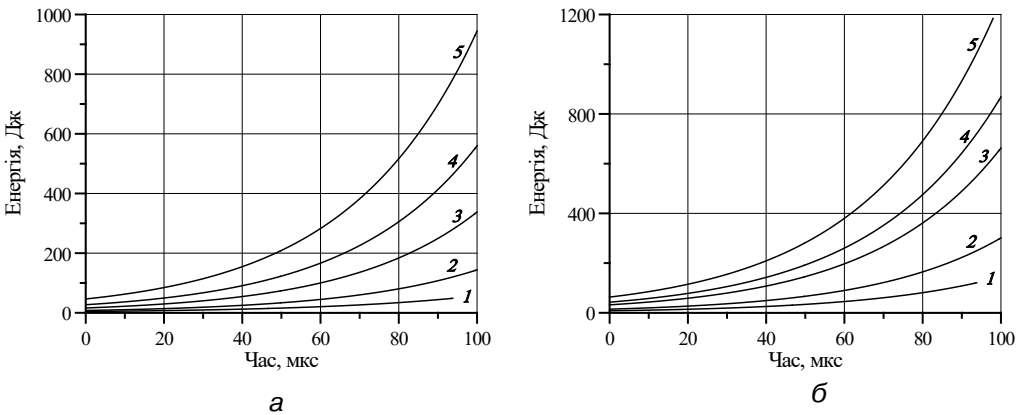


Рис. 6. Кількість поглинутої енергії пористим каркасом залежно від тиску пресування: а — до відпалу; б — після відпалу; 1–20 МПа; 2–50 МПа; 3–100 МПа; 4–150 МПа; 5–200 МПа

Параметри енергопоглинаючого елемента (ЕПЕ) задано відповідно до варіанта розрахунку з вихідних даних. Загальний вигляд моделювання швидкості деформації пористого каркаса з металевої стружки представлено типовими кадрами на рис. 7.

За результатами чисельного моделювання можна встановити, що зміна фізико-механічних властивостей енергопоглинаючого елемента має суттєвий вплив на кількість енергії, що ним поглинається, відповідно, це буде впливати й на ефективність його функціонування.

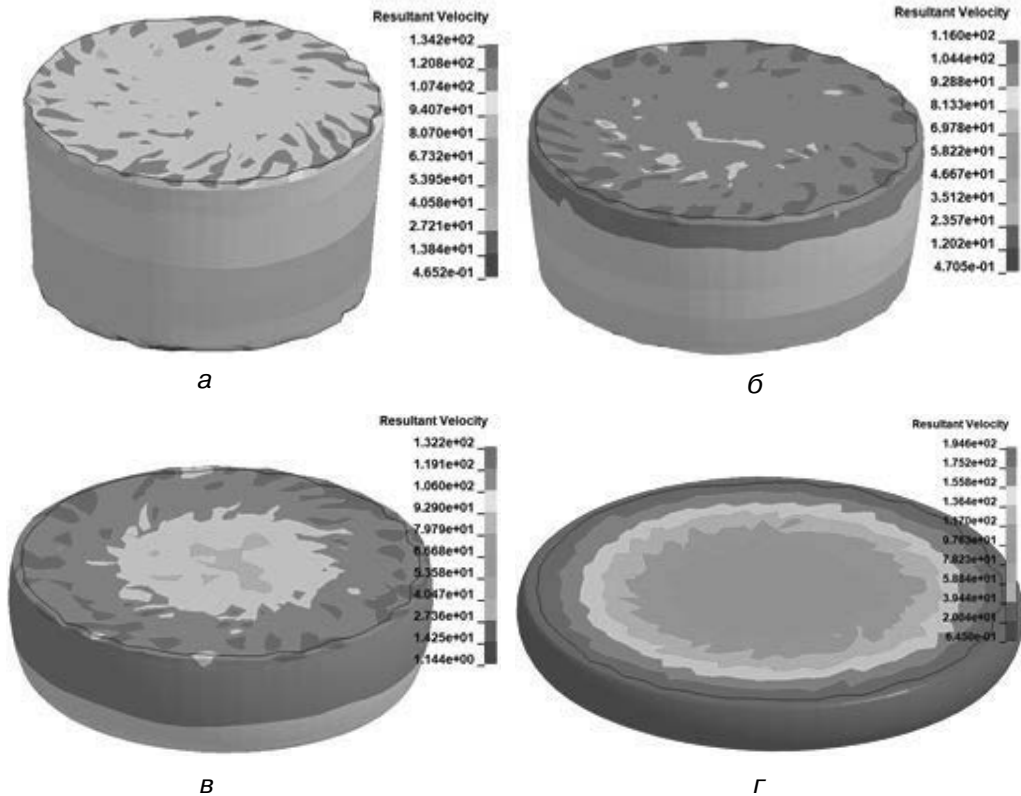


Рис. 7. Кадри деформування ЕПЕ при ударі падаючою масою залежно від часу: а — 1.9959×10^{-5} с; — 3.99844×10^{-5} с; в — 5.99704×10^{-5} с; г — 8.99978×10^{-5} с

Енергопоглинаючі елементи, сформовані з металевої стружки після відпалу, мають вищі фізико-механічні характеристики та енергію поглинання удару порівняно з металевим каркасом, виготовленим із невідпаленої стружки.

Напрямок подальшого дослідження: доцільно провести механічні випробування на вертикальний вісесиметричний удар з оцінкою прискорень падаючої маси для різних варіантів, оцінити зміну форми енергопоглинаючих елементів при ударі та провести відповідне чисельне моделювання, що дасть змогу оцінити точність та адекватність розробленої чисельної моделі і можливість її застосування для подальших досліджень вибухостійкості дослідних зразків елементів протимінних екранів.

Висновки та перспективи дослідження.

Основними проблемами під час виготовлення пористого каркаса з відходів металообробки є складність деформації стружки через неоднорідний хімічний склад та домішки різних металів, що перешкоджає отриманню однорідного каркаса. Попередній відпал в середовищі гостро осушеного водню дозволяє збільшити пластичність металу та забезпечити пористість у межах від 70 до 35 % в діапазоні тисків пресування 50–150 МПа.

Результати роботи можуть бути використанні при виготовленні енергопоглинаючих елементів протимінного захисту з малою питомою вагою та густиною, у тому числі із відходів металообробки, що значно здешевлює такі матеріали.

Список літератури

- 1 Технології переробки металевої стружки (Огляд) / О. Веретільник та ін. *Сучасна електрометалургія*. 2020. № 1. С. 31–38. URL: <https://doi.org/10.37434/sem2020.01.06>.
- 2 Дьяконов О. Исследование физико-химических и механических свойств стальной и чугуновой стружки. *Литье и металлургия*. 2009. № 4 (53). С. 161–173.
- 3 Чернишов О., Узбек А. Дослідження основних характеристик металевої стружки з метою її подальшої переробки. *Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки)*, м. Дніпродзержинськ. ДДТУ, 2015. С. 50–54.
- 4 Підвищення ефективності процесу очищення металевої стружки від мастильно-охолоджуючих рідин за допомогою миючих розчинів / О. Чернишов та ін. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського*. 2018. № 5 (112). С. 103–109.
- 5 Дослідження параметрів процесу очищення металевої стружки від МОР / О. Чернишов та ін. *New leading technologies in machine building: Addition for proceedings XXV international conference*, м. Koblevo, 3 верес. 2017 р. 2017. С. 9–11.
- 6 Спосіб отримання злитків зі стружки : пат. 54324 Україна. Заявл. 30.03.2010; опубл. 11.10.2010.
- 7 Переработка стружки жаропрочной стали ЭП609Ш способом компактирования под электрическим током с последующим электрошлаковым переплавом / В. Шаповалов та ін. *Современная электрометаллургия*. 2011. № 4. С. 46–48.
- 8 Электротермическое компактирование металлических материалов: возможности и перспективы / В. Шаповалов та ін. *Заготовительные производства в машиностроении*. 2011. № 5. С. 5–10.
- 9 Біметалеві виливки на основі алюмінієвого сплаву / Б. Кивгило та ін. *Теорія і практика металургії*. 2022. № 3. С. 15–21.
- 10 Створення біметалевих матеріалів системи залізо-алюміній, отриманих методом інфільтрації пористих каркасів / Б. Кивгило та ін. *Теорія і практика металургії*. 2022. № 6. С. 26–33.
- 11 Степанчук А.М. Теорія і технологія пресування порошкових матеріалів: навч. посіб. Київ: НТУУ «КПІ», 2017. 336 с.
- 12 ДСТУ 4121-2002. Метали чорні вторинні. Загальні технічні умови. Чинний від 2003-04-01. Вид. офіц. Київ: УкрНДНЦ, 2003. 40 с.
- 13 Вплив умов спікання на структуроутворення композиційних матеріалів на основі вольфраму / А.В. Мініцький та ін. *Метал та лиття України*. 2023. № 2 (31). С. 62–68. URL: <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.02.062>.
- 14 Криворучко Д., Залога В. Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы: монография / под ред. В. Залоги. Сумы: Университетская кн., 2012. 496 с.
- 15 Криворучко Д., Залога В., Корбач В. Основи 3D-моделювання процесів механічної обробки методом скінченних елементів. Суми : СумДУ, 2010. 209 с.
- 16 Числове моделювання пробиття гомогенної перешкоди ударниками з різною формою головної частини / С. Бісик та ін. *Озброєння та військова техніка*. 2017. № 2 (14). С. 17–22. URL: [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.2\(14\)](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.2(14)).
- 17 Порівняння ефективності підходів до числового моделювання пробиття ударником гомогенної перешкоди / С. Бісик та ін. *Озброєння та військова техніка*. 2017. № 3 (15). С. 8–15. URL: [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.3\(15\)](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.3(15)).

Надійшла 01.01.2024

References

- 1 Veretilnyk O. et al. (2020). Technologies of metal chip processing (Review). *Modern electrometallurgy*. No1. pp. 31–38. URL: <https://doi.org/10.37434/sem2020.01.06> [in Ukrainian].
- 2 Diakonov O. (2009). Investigation of physicochemical and mechanical properties of steel and cast iron chips. *Casting and metallurgy*. No 4 (53). pp. 161–173 [in Russian].
- 3 Chernyshov O. and Uzbek A. (2015). Research of the main characteristics of metal chips for the purpose of their further processing. Collection of scientific papers of Dniprodzerzhynsk State Technical University (technical sciences), Dniprodzerzhynsk. DSTU. pp. 50–54 [in Ukrainian].
- 4 Chernyshov O. et al. (2018). Improving the efficiency of the process of cleaning metal chips from lubricating and cooling liquids using detergent solutions. *Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*. No 5 (112). pp. 103–109 [in Ukrainian].
- 5 Chernyshov O. et al. (2017). Study of the parameters of the process of cleaning metal chips from coolant New leading technologies in machine building: Addition for proceedings of the XXV international conference, pp. 9–11 [in Ukrainian].
- 6 Method for producing ingots from chips: pat. 54324 Ukraine. Decl. 30.03.2010; published 11.10.2010.
- 7 Shapovalov V.A. et al. (2011). Processing of chips of heat-resistant steel EP609Sh by compacting under electric current with subsequent electroslag remelting. *Modern electrometallurgy*. No4. pp. 46–48 [in Russian].
- 8 Shapovalov V.A. et al. (2011). Electrothermal compacting of metallic materials: opportunities and prospects. *Preparatory productions in mechanical engineering*. No 5. pp. 5–10 [in Russian].
- 9 Kyvgilo B. et al. (2022). Bimetallic castings based on aluminum alloy. *Theory and practice of metallurgy*. No 3. pp. 15–21 [in Ukrainian].
- 10 Kyvgilo B. et al. (2022). Creation of bimetallic materials of the iron-aluminum system obtained by the method of infiltration of porous frameworks. *Theory and practice of metallurgy*. No 6. pp. 26–33 [in Ukrainian].
- 11 Stepanchuk A. M. (2017). Theory and technology of pressing powdered materials: a textbook. Kyiv: NTUU «KPI» [in Ukrainian].
- 12 DSTU 4121-2002. (2003). Ferrous secondary metals. General technical conditions. Valid from 2003-04-01. *Published by the official*. Kyiv: UkrNDNC.
- 13 Minitsky A. V. et al. (2023). Influence of sintering conditions on the structure formation of tungsten-based composite materials. *Metal and casting of Ukraine*. No 2 (31). pp. 62–68. URL: <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.02.062> [in Ukrainian].
- 14 Krivoruchko D. and Zaloga V. (2012). Modeling of cutting processes by finite element method: methodological foundations : monograph : monographiia / ed. by V. Zaloga. Sumy: University Book [in Russian].
- 15 Krivoruchko D., Zaloga V., Korbach V. (2010). Fundamentals of 3D modeling of machining processes by the finite element method. Sumy: Sumy State University [in Ukrainian].
- 16 Bisysk S. et al. (2017). Numerical modeling of penetration of a homogeneous obstacle by impactors with different shapes of the head part. *Arms and military equipment*. No 2 (14). pp. 17–22. URL: [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.2\(14\)](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.2(14)) [in Ukrainian].
- 17 Bisysk S. et al. (2017). Comparison of the effectiveness of approaches to numerical modeling of penetration of a homogeneous obstacle by a striker. *Arms and military equipment*. No 3 (15). pp. 8-15. URL: [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.3\(15\)](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.3(15)) [in Ukrainian].

Received 01.01.2024

M. Yamshinskij, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Department Chair;

e-mail: yamshinskiy@ukr.net; ORCID 0000-0002-2293-2939, Researcher ID:

I-4267-2017, Scopus Author ID: 6508061815,

E. Byba, PhD (Engin.), Associate Professor, Associate Professor;

e-mail: byba.evgen@gmail.com; ORCID 0000-0002-1696-300X, Researcher ID:

AAK-1757-2020, Scopus Author ID: 57212388833,

A. Minitskyi, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Professor;

e-mail: aminitsky@gmail.com; ORCID 0000-0001-5767-4071, Researcher ID:

AAK-1245-2020, Scopus Author ID: 8326737200,

I. Lukianenko, PhD (Engin.), Associate Professor; e-mail: lukianenkoiv@gmail.com;

ORCID 0000-0002-1043-9688, Researcher ID: J-7294-2017, Scopus Author ID:

57224367323

S. Bisyk*, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of the Research and Testing Department of the Ukraine National Defence University; e-mail: sergey-new@ukr.net;

ORCID 0000-0002-5009-2113, Researcher ID : AAD-2824-2019, Scopus Author ID:

57214917155

V. Hryniuk*, Head of the Military Training Department of the National Defense University of Ukraine; e-mail: vova_kira_alla@ukr.net,

B. Kyvhylo, graduate student; e-mail: kyvhylo.bohdan@gmail.com;

ORCID 0000-0001-5890-9020

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine),

*Research and Testing Department of the Ukraine National Defence University (Kyiv, Ukraine)

STUDY OF FORMATION PROCESSES, STRUCTURE AND PROPERTIES OF POROUS FRAMEWORKS

Waste from machine-building companies in the form of ferrous and non-ferrous metal chips can have a negative impact on the environment. Some of the possible environmental consequences of metal cord and chips waste are air pollution, dust generation containing harmful chemicals such as lead, cadmium, chromium and other toxic metals, soil contamination, water pollution. All of these pose a threat to human and animal health. It was established that the treatment of metal chips with a 0.1 normal solution of hydrochloric acid in alcohol removes harmful impurities (aluminum, zinc, lead) from the surface of metal chips, which are part of lubricating and cooling fluids and reduces the sulfur content on the surface from 0.146 to 0.089 %. At the same time, hydrochloric acid activates the surface of steel chips by converting iron oxides or hydroxides into iron chlorides, which in turn promotes wetting processes during the infiltration of liquid aluminum melt. Annealing at a temperature of 700 °C in an environment of sharply dehydrated hydrogen improves the plastic properties of metal chips and reduces internal compressive stresses from -450 MPa to -112 MPa. Annealing in a reducing environment decreases the amount of iron oxide on the surface of metal chips from 11.0 % to 7.0 %, which further improves its plastic properties. The study of the process of forming a porous framework showed that at pressing pressures of 50-150 MPa, porosity at the level of 30-50 % is ensured. Increasing the pressing pressure is impractical due to the rise in the number of closed pores that impede the infiltration of the liquid melt. According to the results of repeated modeling, it was found that energy-absorbing elements formed from metal chips after annealing have higher physical and mechanical characteristics and impact absorption energy compared to a metal frame made of non-annealed chips.

Keywords: metal chips, structure, porosity, prediction, technological processes, geometric dimensions of the porous channels.