

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПРИПІКАННЯ МІДІ

*Р. І. Гарбер, Л. М. Поляков, В. М. Михайловський*

Припикання міді проводилось протягом однієї години у вакуумі  $10^{-5}$  мм рт. ст. при температурах  $300-900^{\circ}\text{C}$  і придавлюючих тисках до  $20 \text{ кг/мм}^2$ .

Виявлено, що міцність з'єднання визначається площею істинного контакту, яка залежить від твердості блоків при температурі припикання і придавлюючого тиску. При наявності дифузійних процесів площа контакту й міцність зростають. Енергія активації в цьому випадку становить  $27,6 \text{ ккал/г-ат}$  при придавлюючому тиску в  $0,7 \text{ кг/мм}^2$  і спадає до  $2,4 \text{ ккал/г-ат}$  при тиску в  $7,5 \text{ кг/мм}^2$ . Останнє можна пояснити впливом поверхневої енергії блоків, яка вивільняється.

### Вступ

При вивченні процесів спікання головна увага звичайно приділяється змінам пористості. Зчеплення на контактних поверхнях між порошинками (припикання) мало досліджено. Поряд з тим, що міцність спеченого матеріалу в значній мірі визначається цим зчепленням, питання про сили взаємодії між примикаючими металевими блоками, має велике значення для ряду проблемних задач металофізики. Зокрема, можна припускати, що при деформуванні кристалів виникають тріщини й розриви, які згодом усуваються за допомогою механізму, подібного до процесу припикання блоків.

Загально визнано вважати, що при досить тісному контакті між поверхнями металевих блоків, що примикають, утворюється міцне з'єднання. Досліди І. В. Обреїмова з слюдою [1] показали, що для відновлення первісної міцності зчеплення між розчепленими по площині спайності листочками слюди досить було забезпечити відсутність сторонніх газів, що досягалось шляхом експериментування у вакуумі. Подібні властивості повинні мати і кристали металів [2]. В роботі [3] досліджувалась міцність з'єднання припечених блоків технічно чистого заліза. Автори цієї роботи прийшли до висновку, що міцність з'єднання визначається площею істинного контакту, яка залежить від зусилля, що притискує, а також від твердості зразків, що припікаються. Дифузійні процеси, на думку цих авторів, можуть лише сприяти збільшенню фактичної площі контакту за рахунок поверхневої й частково об'ємної рухомості атомів. При цьому вони вважають, що в їх дослідях впливу дифузії не виявлено. Експериментуючи зі сталем за величиною навантаженням, дослідники не змогли виявити співвідношення між величиною тиску та інтенсивністю процесів, що відбуваються при припиканні.

В роботі [4] досліджувалось вільне спікання порошинок міді, які одержані електролітичним методом. При цьому було показано, що порошинки припікаються і утворюють компактні конгломерати при порівняно низьких температурах (включаючи кімнатну). Дифузійний характер цих процесів підтверджується тим, що вони відбуваються при відсутності придавлюючих тисків. Однак в роботі [4] не було можливості висвітлити питання про міцність з'єднання при утворенні конгломератів. Тому вва-

жалось цікавим перевірити міцність з'єднань, утворюваних при припиканні мідних блоків, при різних температурах і тиску, що контролюється. Для дослідів була використана мідь марки М-3. Поряд з визначенням міцності з'єднань в цій роботі досліджувались зміни мікроструктури блоків поблизу контактних поверхень, де локалізовані процеси припикання. Для порівняння тисків, що застосовувались, з опором зім'яття використаних зразків була виміряна температурна залежність твердості цієї марки міді.

### Методика та установка

Припикання здійснювалось у вакуумі. Для цього була використана циліндрична вакуумна камера, в якій за допомогою масляного дифузійного насоса підтримувався вакуум, що відповідав тиску  $10^{-6}$ — $10^{-5}$  мм рт. ст. В середині камери було змонтовано пристрій, що складався з печі опору, гнізда для укладки зразків, навантажуючого пристрою і вантажу (рис. 1). Необхідний тиск здійснювався за допомогою системи важелів і тяг, на які навішувалися вантажі спеціальної форми — 1.

Шарніри, що були виготовлені з шарикопідшипників 2, розміщувалися у таких місцях, де вони не мали б змоги нагріватися під час досліду. Величину прикладеного зусилля можна було встановлювати в межах від 15 до 200 кг відповідним набором вантажів. З метою теплової ізоляції зразків підставка 3 укріплювалась на керамічній трубці 4 за допомогою порожнистого гвинта 6 і плити 5. Теплоізоляція верхньої перекладини 7 здійснювалась таким же способом. Для підігріву зразків використовувалась піч 8, яка складалась з двох частин, з'єднаних по діаметральному перерізу.

Для припикання виготовлялись зразки, які мали форму круглих шайб з різьбою на поверхні, як це показано на рис. 2. Діаметр внутрішнього отвору кожного зразка дорівнював 3 мм. Зовнішній діаметр циліндричного виступу визначався згідно з вибраним тиском припикання й величиною прикладеного зусилля. В кожному досліді припикання зазнавав стовпчик з п'яти зразків (рис. 3). Змінюючи величину діаметра циліндричних виступів окремих зразків, зібраних в одному стовпчику, можна при одному й тому ж зусиллі проводити дослід одночасно при чотирьох різних тисках на контактних поверхнях в цілком однакових умовах (температура, тривалість, вакуум). Кільцева форма контактних поверхень забезпечувала підвищену стійкість стовпчика і надійність самого контакту. Спай термопари вводився всередину отвору в стовпчику. Найбільша різниця температури по довжині стовпчика не перевищувала  $10^{\circ}$ , що перевірялося за допомогою двох термопар. Контактні поверхні зразків оброблялись на токарному верстаті, потім шліфувались наждачними аркушами, після чого ретельно відмивались від абразивів. З метою забезпечення правильної плоскої форми поверхень, що підлягали припиканню, зразки здавлювались між двома загартованими та полірованими плоскими плитами. На-

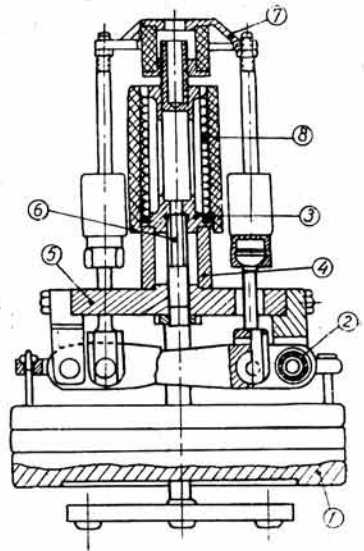


Рис. 1. Установка для припикання у вакуумі: 1 — знімні вантажі; 2 — шарикопідшипникова опора; 3 — гніздо для укладення зразків; 4 — керамічна труба; 5 — установочна плита; 6 — порожнистий гвинт; 7 — навантажуюча траверса; 8 — піч опору.

клепка знімалась при наступному відпалі. Підготовка зразків закінчувалась електрополіруванням, обезжирюванням і просушкою у вакуумі зібраного і стиснутого навішаним вантажем стовпця.

Температура доводилась до заданої величини протягом 7—8 хвилин. В процесі підвищення температури тиск в камері не перевищував  $10^{-5}$  мм рт. ст. Задана температура підтримувалась з точністю  $\pm 10^\circ$  протягом усього часу припикання, який в усіх дослідах дорівнював одній годині.

Охолодження зразків до  $200\text{--}250^\circ$  продовжувалось не більше 10 хвилин. Послідуюче охолодження до кімнатної температури тривало значно довше.

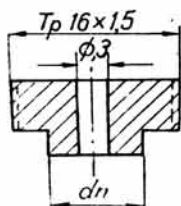


Рис. 2. Схема зразка для припикання.

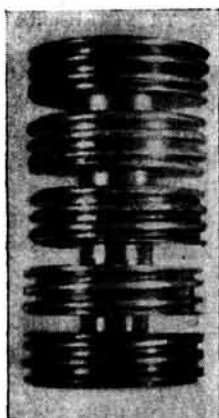


Рис. 3. Стівчик з п'яти зразків, приготовлений для досліду.



Рис. 4. Випадок відриву з частковим зруйнуванням одного з зразків.

Міцність з'єднання після припикання визначалась при кімнатній температурі на дослідній машині ІМ-4Р. На рис. 4 наведена фотографія однієї пари зразків після випробування міцності з'єднання на розрив. Для розриву стівчик із зразками захватувалась в спеціальних затискачах таким чином, щоб зусилля зазнавала лише одна пара зразків; для цього крайній зразок вгвинчувався в захват, а на припечений до нього зразок надівались розрізні губки другого затискача. Границя міцності з'єднання  $\sigma_n$  визначалась як відношення розривного зусилля до площі кільцевої поверхні. Вимір діаметрів кільця провадився на інструментальному мікроскопі.

Для дослідження мікроструктури блоків поблизу поверхні контакту спечений набір зразків розрізався вздовж діаметральної площини. Поверхня перерізу шліфувалась, полірувалась, травилась на зерно в концентрованої азотній кислоті і старанно промивалась дистильованою водою.

Твердість міді М-3 при  $t=300\text{--}900^\circ$  була виміряна на спеціальній установці у вакуумі ( $10^{-5}$  мм рт. ст.) при вдавлуванні в мідний зразок победітової кульки діаметром 9,02 мм. Кожний зразок спочатку відпалювався у вакуумі при температурі  $600^\circ$  на протязі однієї години. Величина твердості підраховувалась за Мейером, тобто як відношення прикладеного вантажу до площі одержаного відтиску. Звичайно вважають, що таке значення твердості краще, ніж брінелівське, відповідає зм'яттю контакту між двома однаковими за твердістю матеріалами.

Навантаження при визначенні твердості витримувалось протягом однієї години з метою наближення до умов дослідів при припиканні. Діаметр відтиску вимірювався на інструментальному мікроскопі, що дозволило дещо підвищити точність його визначення.

## Результати досліджень

На рис. 5 дана залежність найбільшої міцності з'єднання  $\sigma_n$  від тиску припикання при різних температурах. Внаслідок перекосів і інших неврахованих причин припикання іноді здійснювалось тільки на частині кільцевої поверхні. На кривих рис. 5 відкладались лише максимальні значення міцності, що були одержані з ряду дослідів при однакових умовах. Як це впливає з рис. 5, в інтервалі температур від 300 до 900° і тисків припикання від 0,2 до 7,5  $\text{кг/мм}^2$  міцність з'єднання  $\sigma_n$  може бути з задовільною

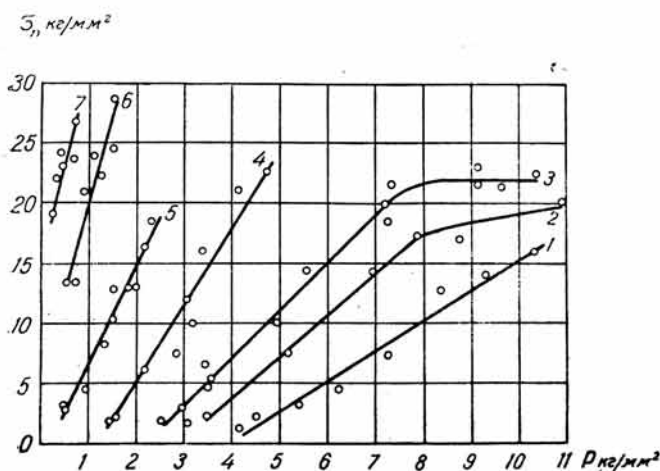


Рис. 5. Залежність границі міцності з'єднання від тиску припикання: 1 — при 300°; 2 — при 350°; 3 — при 450°; 4 — при 600°; 5 — при 750°; 6 — при 825°; 7 — при 900°.

точністю подана як лінійна функція тиску  $p$ . Припикання при температурі нижче 300° і тисках до 27  $\text{кг/мм}^2$  давало настільки великий розкид величин міцності з'єднання, що утруднювалось однозначне тлумачення результатів. Найменший тиск, необхідний для здійснювання припикання в досліджуваному інтервалі температур, тим більший, чим нижча температура. При високих температурах (900°) припикання спостерігалось починаючи з тиску 0,2  $\text{кг/мм}^2$ . Екстраполяція кривих рис. 5 в бік низьких тисків дає при температурі нижче 750° перетин з віссю тисків  $p$ , а вище 750° — з віссю міцностей  $\sigma_n$ . Таким чином, при підвищених температурах припикання можливе навіть без притискуючого зусилля, тобто при  $p=0$ .

Очевидно, що значення величини  $\sigma_n$  обмежене міцністю компактної міді  $\sigma_b$ . Однак на рис. 5 помітно, що при занижених температурах (360—450°) має місце тенденція до насичення кривої  $\sigma_n = \sigma_n(p)$  з ростом тиску. Найбільше значення  $\sigma_n$ , одержане при температурах 300—450°, виявляється нижче міцності компактної міді.

З метою виявлення температурної залежності міцності з'єднання при припиканні побудовані (за даними рис. 5) криві залежності  $\ln \sigma_n$  від обернених значень абсолютної температури (рис. 6).

Параметрами на кривих  $\ln \sigma_n = \ln \sigma_n \left( \frac{1}{T} \right)$  обрані деякі значення тисків припикання. Наявність на цих кривих прямолінійних відрізків дає підставу вважати, що процесу припикання при кожному заданому тиску відповідає певна величина енергії активації  $Q(p)$ , яка пропорційна тангенсу кута нахилу кривих на рис. 6. Значення  $Q(p)$  наведені в табл. 1 і на рис. 7. З рис. 6 видно, що при температурі 300° всі значення міц-

ності занижені. Проте значне підвищення тиску і при цій температурі дає з'єднання високої міцності. Так, наприклад, з дослідів, результати яких не наведені на рис. 5, випливає, що при температурі 300° і тиску 20,4 кг/мм<sup>2</sup> міцність з'єднання дорівнює 20,2 кг/мм<sup>2</sup>.

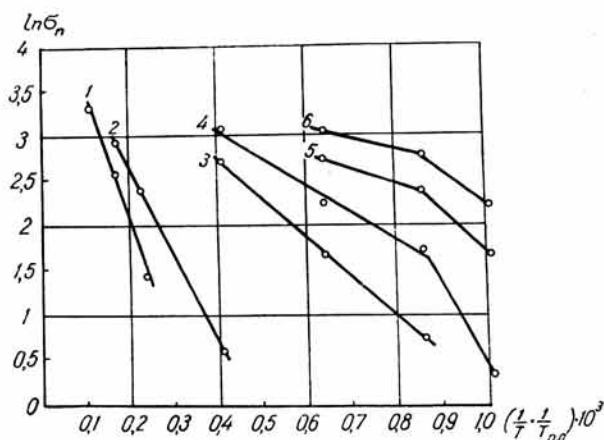


Рис. 6. Залежність логарифма границі міцності від оберненої температури припикання: 1 — при  $p = 0,7$  кг/мм<sup>2</sup>; 2 — при  $p = 1,5$  кг/мм<sup>2</sup>; 3 — при  $p = 3,5$  кг/мм<sup>2</sup>; 4 — при  $p = 4,5$  кг/мм<sup>2</sup>; 5 — при  $p = 6$  кг/мм<sup>2</sup>; 6 — при  $p = 7,5$  кг/мм<sup>2</sup>.

Температурна залежність тиску припикання  $p = p(t)$ , необхідного для одержання певної міцності з'єднання, що дорівнює 20 кг/мм<sup>2</sup>, наведена на

Таблиця 1

Тиск припикання, $p$ $\frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$	Температура припикання, $t$ °C	Міцність з'єднання, визначена при кімнатній температурі, $\sigma_n$ $\frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$	Енергія активації, обчислена за кутовим коефіцієнтом прямолінійних відрізків кривих рис. 6, $Q(p)$ $\frac{\text{ккал}}{\text{с-ат}}$
0,7	900	27,0	27,6
	825	13,1	
	750	4,2	
1,5	825	18,6	20,0
	750	10,8	
	600	2,0	
3,5	600	14,8	8,6
	450	5,2	
	350	2,0	
4,5	600	21,2	6,0
	450	9,2	
	350	5,5	
6,0	450	15,1	3,2
	350	10,7	
7,5	450	20,8	2,4
	350	15,9	

рис. 8. Для порівняння там же наведені залежності твердості  $H=H(t)$  від температури і відношення  $\frac{p}{H}$ .

Крива  $p=p(t)$  вказує на те, що для одержання рівномірного з'єднання в області занижених температур (300—400°) потрібне різке підвищення тиску. Це можна пояснити відповідним підвищенням твердості міді в тому ж інтервалі температур, як це впливає з кривої  $H=H(t)$  на рис. 8 (див. також табл. 3).

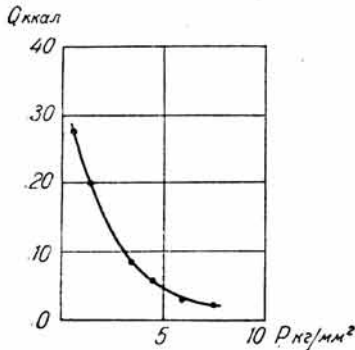


Рис. 7. Залежність енергії активації від питомого тиску припикання.

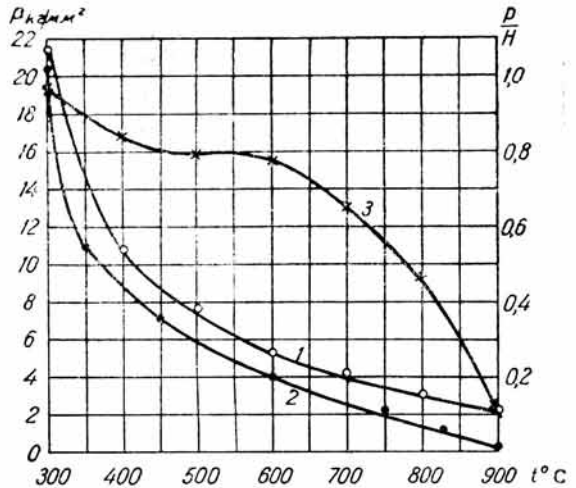


Рис. 8. 1—температурна залежність тиску  $p=p(t)$  для рівномірних з'єднань при  $\sigma_{II} = 20$  кг/мм<sup>2</sup>; 2—температурна залежність твердості  $H=H(t)$  міді марки М-3 (під навантаженням протягом однієї години); 3—відношення  $\frac{p}{H} = \frac{p}{H}(t)$ .

Різкий спад кривої  $\frac{p}{H}$  при підвищених температурах відображає, очевидно, вплив дифузійних процесів на міцність з'єднання.

На рис. 9—13 наведено мікрофотографії областей, примикаючих до контактних поверхень тих зразків, які припікались в умовах, що приводять до утворення з'єднань міцністю від 21,5 до 23,6 кг/мм<sup>2</sup>.

Зміни температури компенсувались відповідними змінами тиску. Легко помітити, що з підвищенням температури розміри окремих кристалітів різко збільшуються (хоч міцність одержаних з'єднань практично однакова). Звертає на себе увагу те, що всі кристали, які утворились поблизу границі переділу, зберігають слід цієї границі у вигляді ланцюжка пустот, пузирів і включень.

Очевидно, кристалізація по обидва боки границі переділу відбувалась так, що лише окремі містки служили орієнтуючими затравками. Для такої рекристалізації нема необхідності у переносі речовини з одного блока в інший. Нові кристаліти будуються з «місцевого» матеріалу, тобто практично бездифузійно або при дуже обмеженій участі дифузійних процесів. Аналогічний дослід мікроструктури зразків, що використовувались при визначенні твердості, показав, що тиск в межах застосованих напруг не впливає на величину зерна при рекристалізації, яка повністю визначається тривалістю і температурою досліду.



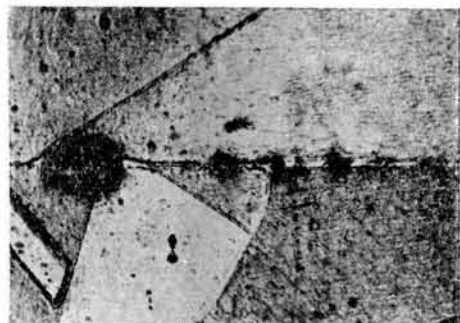


Рис. 9.  $\sigma_n = 23,6 \text{ кг/мм}^2$ ;  $t = 900^\circ$ ;  
 $p = 0,52 \text{ кг/мм}^2$ .

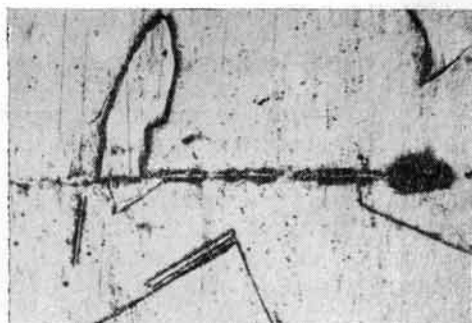


Рис. 10.  $\sigma_n = 20,5 \text{ кг/мм}^2$ ;  $t = 900^\circ$ ;  
 $p = 0,27 \text{ кг/мм}^2$ .

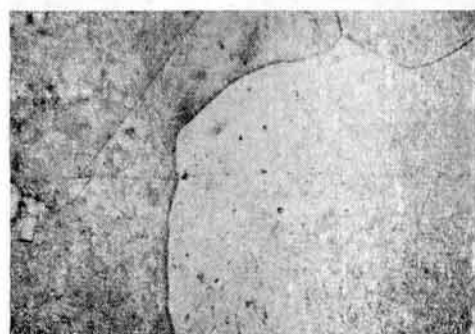


Рис. 11.  $\sigma_n = 21,5 \text{ кг/мм}^2$ ;  $t = 825^\circ$ ;  
 $p = 1,11 \text{ кг/мм}^2$ .

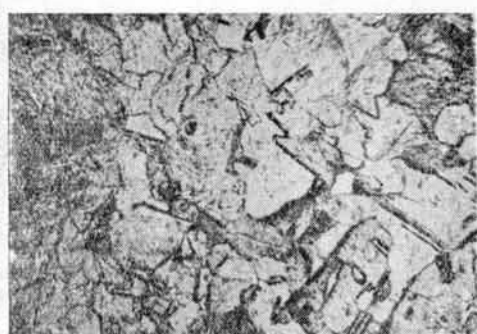


Рис. 12.  $\sigma_n = 22,5 \text{ кг/мм}^2$ ;  $t = 600^\circ$ ;  
 $p = 4,75 \text{ кг/мм}^2$ .

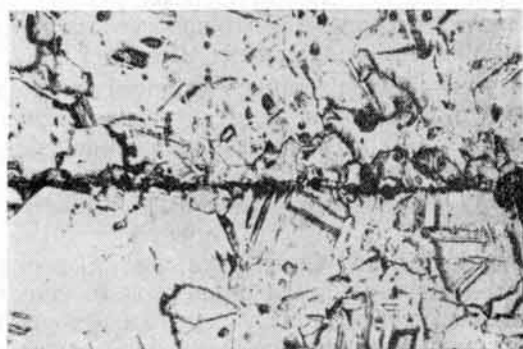


Рис. 13.  $\sigma_n = 22,5 \text{ кг/мм}^2$ ;  $t = 450^\circ$ ;  
 $p = 8,73 \text{ кг/мм}^2$ .

Мікрофотографії шліфів області контакту між припеченими блоками ( $\times 70$ ). Тут  $\sigma_n$ — міцність з'єднання, встановлена при кімнатній температурі при випробуванні на відрив;  $t$  — температура припикання;  $p$  — придавлюючий тиск при припиканні. Тривалість витримки при вказаних температурах в усіх випадках — одна година.

Таблиця 2

Температура $t$ , °C	300	350	450	600	900
Довжина дифузійного переміщення атомів міді, що визначена за формулою $\sqrt{L\tau}$ , см	$0,25 \cdot 10^{-8}$	$1,85 \cdot 10^{-8}$	$45,0 \cdot 10^{-8}$	$0,14 \cdot 10^{-4}$	$9,32 \cdot 10^{-4}$

## Обговорення результатів

Вищеописані досліди свідчать, що припикання — складний комплекс процесів. Результат припикання, який оцінюється за міцністю одержаного з'єднання, визначається головним чином температурою, придавлюючим тиском, пластичними якостями металічних блоків, якістю поверхень, природою і розподілом забруднень на контактуючих поверхнях. В наших дослідах вплив цих факторів, крім перших трьох, був по можливості стабілізований, причому пластичні якості металів розглядались як певна функція температури.

Тому, по суті, досліджено лише вплив температури і придавлюючого тиску.

Згідно з [3] можна вважати, що міцність з'єднання цілком залежить від величини істинної сумарної площі контакту, яка визначається лише придавлюючим тиском і твердістю блоків, що спікаються. В цій роботі показано, однак, що в процесі припикання міцність зростає за рахунок дифузійного переміщення матеріалу.

Тому доводиться серйозну увагу приділяти тепловому руху і роботі переміщення атомів. Можливо, що роль дифузійних процесів зводиться тільки до збільшення площі контакту між блоками. Експериментуючи з однокомпонентними матеріалами, ми можемо уникнути створення сплавів і питання міцності з'єднання розв'язувати тільки як проблему наближення атомів до нормальних для даного металу міжатомних відстаней в кристалічній ґратці. Звертаючись до дифузійних процесів, що забезпечують таке наближення, ми повинні виходити з даних самодифузії. Довжини самодифузійного переміщення атомів міді на протязі однієї години для різних температур наведені в табл. 2.

У вищеописаних дослідах було досягнуто досить міцне з'єднання блоків міді, що спікались при температурі 300°, тобто в умовах, коли, згідно з даними табл. 2, відстань дифузійного переміщення атомів на порядок величини менша, ніж стала кристалічної ґратки. Це дозволяє твердити, що об'ємна дифузія не є необхідною для пояснення процесів припикання.

Дифузійні процеси, очевидно, відіграють помітну роль при більш високих температурах, особливо коли врахувати, що коефіцієнт поверхневої дифузії може бути значним.

В тих випадках, коли дифузійні процеси на границі відіграють істотну роль для описаних тут дослідів (це має місце починаючи з 350°), а переміщення атомів (обчислене за формулою  $x = \sqrt{D\tau}$ ) стає більшим за міжатомні відстані, міцність з'єднання повинна бути пропорціональна експоненті  $\frac{Q(p)}{kT}$ .

Цей висновок підтверджується прямолінійністю кривих  $\ln \sigma_{ii} = \ln \sigma_{ii} \left( \frac{1}{T} \right)$



Таблиця 3

Температура, $t$ °C	300	400	500	600	700	800	900
Тиск $p$ , $\frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$ *	20,4	9,0	9,0	5,9	4,0	2,7	0,27
Твердість $H$ , $\frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$	21,4	10,7	7,6	5,20	4,1	2,95	2,14
$\frac{p}{H}$	0,97	0,84	0,78	0,79	0,66	0,47	0,13

\* Тут наведені тиски, що забезпечують в процесі припикання при вказаних температурах міцність з'єднання  $\sigma_{\text{II}} = 20 \text{ кг/мм}^2$ .

(рис. 6) в інтервалі температур від 350 до 900°. Злам кривих при 350° можна пояснити тим, що саме при цій температурі  $\sqrt{D\tau}$  приблизно дорівнює міжатомній відстані. Вважаючи  $Q(p)$  за енергію активації, ми повинні пояснити причину різкого її зменшення в міру збільшення придавлюючого тиску  $p$ , а також те, що при  $p$ , близькому до нуля,  $Q(p) = \frac{1}{2}Q$ , де  $Q$  — енергія активації при самодифузії міді.

Відмінність  $Q(p)$  від  $Q$  легко віднести за рахунок того, що в наших дослідах істотну роль відіграють явища поверхневої дифузії, для якої енергія активації завжди нижча, ніж для об'ємної. Але закономірне її зниження (при підвищенні придавлюючого тиску) до 2,4 ккал/г-ат потребує фізичної інтерпретації. Можна припустити, що при підвищенні тиску збільшується доля поверхневої енергії, що вивільняється, а це приводить до зменшення величини  $Q(p)$ , яка, взагалі кажучи, складається з різниці  $Q(0) - f(p, \alpha)$ , де  $\alpha$  — коефіцієнт поверхневого натягу металу при температурі припикання.

### Висновки

1. Дослідження міцності з'єднань блоків міді, одержаних припиканням, дають підставу твердити, що міцність з'єднання визначається площею істинного контакту, який утворюється в процесі припикання. Вона не залежить від взаємного проникнення атомів блоків, що спікаються, і рекристалізаційного росту зерен.

2. Величина площі контакту визначається твердістю блоків, що припикаються, при температурі досліду, і придавлюючим тиском; в процесі припикання можливе також і дифузійне збільшення цієї площі, якщо припикання провадиться при досить високих температурах і триває відносно довго.

3. При наявності дифузійних процесів є можливість визначити енергію активації, яка становить приблизно половину енергії активації самодифузії при дуже малих придавлюючих тисках і зменшується до 2,4 ккал/г-ат при тиску 7,5 кг/мм<sup>2</sup>. Така залежність енергії активації від тиску може бути пояснена, якщо вважати, що із збільшенням тиску вивільняється еквівалентна частина поверхневої енергії блоків, що припикаються.

### ЛІТЕРАТУРА

1. И. В. Обреимов, Proc. Roy. Soc., A, 127, 291 (1930).
2. Е. М. Лифшиц, ДАН СССР, 97, 4, 643 (1954).
3. Н. Held, Н. Hendus, Zs. Metallkunde, 45, 3 (1954).
4. Р. И. Гарбер и С. С. Дьяченко, ЖТФ, 22, 7, 1097 (1952).

Фізико-технічний інститут АН УРСР,  
Харків

Надійшла до редакції  
18.VII 1955 р.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИПЕКАНИЯ МЕДИ

*Р. И. Гарбер, Л. М. Поляков, В. М. Михайловский*

## Резюме

Настоящее исследование было предпринято в связи с проблемой прочности спеченных металлов, конгломератов порошков и пластичности деформированных металлов.

В последнем случае можно полагать, что процесс пластической деформации сопровождается образованием большого количества микротрещин и разрывов, которые «залечиваются» в результате припекания, особенно при наличии прижимающих давлений. Такое предположение может быть хорошо использовано при объяснении влияния характера напряженного состояния и температуры на пластичность металлов. Работы [1, 2] дают основание считать, что прочность соединения зависит исключительно от величины площади истинного контакта; в работе [3] высказывается утверждение, что в процессе припекания диффузионные явления не играют существенной роли. В [4] было показано, что конгломераты порошков меди образуются при невысоких температурах, начиная с комнатной. Для сопоставления этих данных было решено исследовать прочность соединения медных колец при различных прижимающих давлениях и температурах, с целью получить количественные данные в возможно более широком интервале температур и давлений. Опыты проводились в вакууме при давлении  $10^{-5}$  мм рт. ст. Установка позволяла одновременно спекать пять колец, сложенных столбиком (рис. 1, 2 и 3). Прочность соединения определялась при комнатной температуре. В табл. 1 и на рис. 5, 6, 7 и 8 приведены результаты измерений. Прочность соединения, как это видно из рис. 5, возрастает с увеличением прижимающего давления. При более высоких температурах эта зависимость приблизительно линейна. При пониженных температурах обнаруживается насыщение. На рис. 6 приведена зависимость логарифма прочности соединения от обратной температуры. Прямолинейность этих кривых позволяет приписать процессу припекания определенную энергию активации, которая уменьшается с ростом прижимающих давлений, как это показано на рис. 7. Отмечается снижение всех данных для температуры ниже  $350^{\circ}$ , которое можно объяснить тем, что при этих температурах и установленной продолжительности опыта (1 час) диффузионные перемещения атомов меди заведомо ниже параметра решетки (см. табл. 2).

На рис. 8 нанесены давления, необходимые для того, чтобы при различных температурах получать равнопрочные соединения (1), твердость меди при тех же температурах (2), а также отношение этих величин (3).

Перечисленные графики, как и другие данные, дают основание заключить, что прочность соединения определяется площадью истинного контакта. Она не зависит от взаимного диффузионного проникновения атомов и рекристаллизации. Величина площади контакта определяется твердостью блоков при температуре опыта и значением прижимающего давления. При повышенных температурах и продолжительных выдержках возможно также и диффузионное увеличение площади контакта. В последнем случае можно оценить энергию активации, которая снижается очень сильно с повышением прижимающего давления. Такую зависимость можно объяснить освобождением части поверхностной энергии под действием прижимающего давления.