

Дослідження мікроструктури дослідних валків показало, що вони не мали чистого відбіленого шару. На відстані 2 мм від поверхні робочий шар мав структуру грубого конгломерату фаз аналогічну структурі середньолегованих валків. На глибині 15 мм від поверхні зустрічалися включення графіту різної форми. З віддаленням від поверхні на більшу глибину кількість графіту зростала. На відстані 15 і 30 мм зустрічалися невеликі ділянки ледебуриту, поява яких була зумовлена підвищеним вмістом вуглецю. Перліт мав дуже тонку будову, аномальної феритної облямівки не було, навіть біля графіту перліт мав дуже тонку будову. Було виявлено невеликі включення рожевого кольору, мабуть структурно вільної міді. Це дало підставу вважати, що для валків масою до 10 т вміст міді слід витримувати у границях 0,7-0,9%. Мікроструктура чавунів верхніх та нижніх шийок мала той самий характер, що й у валках виконання ЛПХНд-62. У поверхневому шарі верхніх шийок спостерігалися великі ділянки карбідів у вигляді сітки по границях зернин з фосфідною евтектикою, що прилягала до них. У структурі нижніх шийок цементиту майже не було, траплялися невеликі ділянки фосфідної евтектики. Твердість робочого шару дослідних валків відповідає твердості валків виконання ЛПХНд-62 і знаходилася в межах 64-67 HSD.

Висновок. При литті валків встановлено доцільність часткового легування їх міддю та зниження таким шляхом витрати більш дорогого та дефіцитного нікелю.

УДК 621.735.34.041:679.7.022.4

**В. В. Каверинський<sup>1</sup>, А. І. Троцан<sup>1</sup>, З. П. Сухенко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України

### **ВПЛИВ ДЕФОРМАЦІЙНО-ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА МІЦНІСТЬ І ПЛАСТИЧНІСТЬ ДООВТЕКТИЧНИХ СИЛУМІНІВ**

Виконане дослідження впливу гарячої пластичної багатостадійної деформації силуміну з проміжними відпалами на показники міцності і пластичності. Базовий склад матеріалу наведено у таблиці 1. Окрім того, досліджено вплив легування і модифікування вихідного виливку. Для модифікування використано оброку  $\text{AgNO}_3$ . У якості додаткових легуючих елементів використано  $\sim 2.0$  Cu та  $\sim 1.0$  Ag. Застосовано Cu- Ag лігатуру у вигляді дроту  $\varnothing 0,9$  мм.

## ЛИТВО.МЕТАЛУРГІЯ. 2023

Таблиця 1 – Базовий хімічний склад досліджуваного матеріалу (мас. %)

Матеріал	Al	Si	Mn	Mg	Cu	Fe	Ag
Базовий	основа	6,8 – 7,1	0,1 – 0,2	0,05 – 0,1	0,3 – 0,5	0,5 – 0,8	—
Легований		6,6 – 7,0	~0,7	0,05 – 0,1	~2,0	0,4 – 0,7	~1,0

Температура початку деформації становила 490 – 540 °С. Температура закінчення деформації не контролювалася точно, але можна вважати її на рівні 400 – 430 °С. Після деформації проводився короткий (~15 хв.) відпуск при 510 – 540 °С суміщений з нагріванням під наступну стадію деформації. Після серії гарячих деформацій, коли матеріал набуває достатньої пластичності у ряді випадків виконано додаткову холодну зміцнювальну деформацію.

У таблиці 2 наведено результати механічних випробувань на розтяг 8 типів зразків (литих, відпалених і деформованих). Литі зразки показали надзвичайно низьку пластичність – їх відносне подовження і звуження близькі до нуля. Для них не спостерігалось також і межі текучості. Базовий немодифікований і нелегований тип литих зразків (№ 1) має тимчасовий опір близько 89,0 МПа. Проте його можна значно підвищити за рахунок модифікування і зазначеного легування (№ 2). Навіть не модифіковані зразки після сумарної 52 % гарячої деформації демонструють значне зростання міцності, яка становить у середньому 196,4 МПа. Також стає можливим визначити і межу текучості. Матеріал набуває деякої пластичності – відносне подовження сталє 6,22%, а звуження – 22,45%.

Таблиця 2 – Результати механічних випробувань

№	Стан зразків	$\sigma_y$ , МПа	$\sigma_u$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	Твердість, НV
1	Базовий литий стан, без модифікування і легування	—	89,0	~ 0	~ 0	67,0
2	Литий стан, модифікування $AgNO_3$ , легований, гартування від 510 °С з природнім старінням	—	139,0	~ 0	~ 0	112,4
3	52 % сумарної гарячої деформації, не модифікований	128,0	196,4	6,22	22,45	50,3
4	30 % сумарної гарячої деформації + 12 % холодного деформаційного зміцнення, не модифікований	251,6	275,7	0,94	0,93	96,8
5	48 % сумарної гарячої деформації + 27 % холодного деформаційного зміцнення (модифікування $AgNO_3$ )	229,5	273,0	3,30	9,30	117,4
6	70 % сумарної гарячої деформації + ~ 2 год. відпал при 540 °С, (модифікування $AgNO_3$ )	63,7	137,1	22,57	58,79	49,2

## ЛИТВО.МЕТАЛУРГІЯ. 2023

7	25 % сумарної гарячої деформації + 9 % холодного деформаційного зміцнення, не модифікований	222,4	260,8	0,06	0,06	106,1
8	38 % сумарної гарячої деформації + 6 % холодного деформаційного зміцнення, легований, гартування від 510 °С з природнім старінням (модифікування AgNO <sub>3</sub> )	288,5	333,3	1,42	1,40	131,0

Модифіковані (але не леговані) зразки, що зазнали більшої сумарної гарячої деформації (~ 70 %), з наступним відпалом при температурі близько 540 °С протягом 2 годин (№ 6) набувають ще більшої пластичності. Їх міцність стає нижчою, але все ж вищою за таку у нелегованих литих зразків у литому стані.

Спостережуване зростання пластичності робить можливим додаткове зміцнення, що продемонстровано на зразках типу № 4, 5 і 7 з таблиці вище. Слід зазначити, що ці зразки набувають досить близьких значень межі міцності на розрив після відповідної деформаційної термообробки. Тип № 5, який зазнав модифікування під час лиття та більшої гарячої деформації, демонструє більшу пластичність після зміцнення, але пластичність № 4 і 7 майже вичерпується після ще меншої холодної деформації. Менший ступінь гарячої деформації, а також немодифікований литий стан зумовлюють нижчий запас пластичності для додаткового деформаційного зміцнення зразків типу 7. Міцність матеріалу можна ще більше підвищити шляхом легування, яке уможливорює зміцнення шляхом загартування та старіння. Про це свідчать зразки типу 8, які, як і зразки № 2, леговані Cu та Ag. Їх середня міцність на розрив після деформаційної термообробки становить 333,3 МПа.

Аналіз результатів показує, що міцність сильно залежить від ступеня як гарячої, так і холодної деформації. Також може мати місце їх неадитивний ефект, але він недостатньо доведений. Залежність міцності від ступеню гарячої деформації не лінійна. Так, сумарний ступінь гарячої деформації до 40 % надає матеріалу додаткову міцність. Вищі гарячі деформації можуть надавати йому додаткової пластичності, однак більшого зростання міцності не спостерігається. Не дивлячись на зростання тимчасового опору і межі плинності, сама лише гаряча деформація не збільшує твердість матеріалу, її зростання скоріш досягається за рахунок деформаційного зміцнення і легування. Гаряча ж деформація може навіть дещо знизити спостережувану твердість. Твердість матеріалу після гарячої деформації залишається на рівні близько 50 HV, що близько до твердості литого матеріалу після відпалу, що також спостерігалось в роботі [1]. Вочевидь, існує певне бар'єрне значення, яке для цього матеріалу становить близько 50 HV і залежить в основному від кремнію. Наприклад, для сплаву з 3,5 % Si вона

становитиме близько 35...36 HV, а для сплаву з 9,0 % Si – близько 56...57 HV [2]. Нижче вказаного значення загальна твердість повністю обумовлена вмістом кремнію, вище – здебільшого твердістю металевої матриці з незначним впливом кремнію.

Одночасне зростання пластичності міцності після гарячої деформації здебільшого викликано зміною морфології кремнієвих включень. Вони подрібнюються і їх форма стає близькою до сферичної. Такі включення значно менше діють як концентратори напруг і мікродфекти, що розривають металеву матрицю при деформації. Проміжні охолодження між гарячими деформаціями імовірно додатково сприяти сфероїзації включень.

### Список літератури

1. Каверинский В. В. Повышение пластичности доэвтектического силумина з счёт деформационно-термической обработки / В. В. Каверинский, А. И. Троцан, З. П. Сухенко // *Металлургическая и горнорудная пробышленность*. – № 3. – 2020. – С. 48 – 58. DOI: 10.34185/0543-5749.2020-3-48-58

2. Kaverinsky V. V. About Al–Si Alloys Structure Features and Ductility and Strength Increasing after Deformation Heat Processing / V. V. Kaverinsky Z. P. Suchenko, G. A. Bagliuk, D. G. Verbylo // *Метолофізика та новітні технології*. – Том. 44. № 6. – 2022. – С. 769 – 784. DOI: 10.15407/mfint.44.06.0769

УДК 669.245.018:629

**Ю. Г. Квасницька, І. І. Максюта, О. В. Михнян, О. В. Нейма,**

**К. Г. Квасницька**

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

*e-mail:* [Neima\\_Alex@ukr.net](mailto:Neima_Alex@ukr.net)

### **МЕХАНІЗМ НЕЙТРАЛІЗАЦІЇ ЛУЖНИХ МЕТАЛІВ ПРИ ОТРИМАННІ ВИСОКОТОЧНИХ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ**

Для забезпечення необхідного рівня експлуатаційних характеристик сучасні дисперсійнотверднучі жароміцні сплави для найбільш навантажених деталей енергетичних установок повинні мати строго контрольований вміст елементів основного та додаткового легуючого комплексу при мінімальному показнику шкідливих домішок. Дослідниками показано що, наприклад натрій, калій, кремній, сірка, фосфор, вісмут, та