

А. С. Опальчук, А. Е. Семеновский

**Повышение механических характеристик низкоуглеродистой стали путем  
измельчения структуры зерна**

**Резюме**

Приведены результаты исследований влияния комплексного легирования титаном и ниобием на склонность низкоуглеродистых сталей к росту аустенитного зерна в процессе нагрева. Исследовано влияние измельчения зеренной структуры на характеристики прочности и вязкости стали.

A. S. Opalchuk, O.E. Semenovskiy

**Increasing mechanical properties of low carbon steels  
with reducing grains size**

**Summary**

The results of research on complex alloying with Ti and Nb influence on inclination low carbon steels to austenite graine growth are presented. Influence of grains reducing to the strength and toughness of steel is studied.

УДК 669.721.5

*Відновлення корпусного авіаційного литва зі  
сплаву МЛ10*

В. А. Шаломєєв, доктор технічних наук

Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя

*Проведено аналіз післяексплуатаційних дефектів авіаційного корпусного литва з магнієвих сплавів. Розроблено і випробувано присадочний матеріал для заварки дефектів корпусних виливків, що забезпечує високу якість відновлюваних виробів.*

Одним з перспективних напрямків розвитку сучасного авіадвигунобудування є можливість повторного використання литих деталей агрегатів при їх плановому технічному обслуговуванні, що дозволяє знизити витрати на виробництво нового литва і підвищити конкурентоспроможність авіаційної техніки [1, 2].

На підприємстві АТ «Мотор Січ» авіаційні двигуни, що пройшли гарантовані терміни експлуатації, при їх плановому технічному обслуговуванні розбирають і оцінюють якісні показники більшості деталей і вузлів. У деяких випадках на поверхні литих деталей, виготовлених з магнієвих сплавів МЛ5 і МЛ10, виявлять наступні невідповідності до вимог нормативно-технічної

документації: викришування, відколи, зношування, мікропористість і тріщини. Найчастіше спостерігали трас- та інтеркристалітні тріщини втомно-корозійного типу. Поверхня тріщин зазвичай покрита щільним шаром окислів грубокристалічної будови, часто з підплавленням границь зерен. Останнє характерно для міжзеренного руйнування металу в перегрітому стані.

За технічними умовами на деталях допускається заварка дефектних місць, яка є досить дорогою і не завжди ефективною. Вона здійснюється тим же матеріалом, що і основа сплаву [3]. Без ускладнень заварюються дефекти на деталях зі сплаву МЛ5, але при заварюванні дефектів на деталях зі сплаву МЛ10 в місцях заварки утворюються нові тріщини, які потребують повторної заварки. Після кількох таких невдалих операцій дорогий виріб бракується і йде на переплав, що знижує ефективність виробництва авіаційних двигунів та здорожує їх собівартість.

Метою дослідження є розробка присадного матеріалу для заварки поверхневих дефектів литих деталей зі сплаву МЛ10 із забезпеченням необхідної їх експлуатаційної якості.

Магнієвий сплав МЛ10 (% по масі): (0,4 – 1,0) Zr, (2,2 – 2,8) Nd, (0,1 – 0,7) Zn, Mg – залишок) виплавляли в індукційній тигельній печі типу ПМ-500 за серійною технологією. Рафінування сплаву проводили флюсом ВІ-2 в роздавальній печі з порційним відбором розплаву, до якого вводили зростаючі присадки скандію (від 0,05 до 1,0 %) магній-скандієвою лігатурою (10 % Sc, 90 % Mg. Стандартні зразки для механічних випробувань діаметром 12 мм заливали в піщано-глинисту форму. Зразки проходили термічну обробку в печах типу Бельв'ю і ПАП-4М за режимом: гартування від  $415 \pm 5$  °С, витримка 15 год, охолодження на повітрі і старіння при  $200 \pm 5$  °С, витримка 8 год, охолодження на повітрі.

Тимчасовий опір розриву і відносне видовження зразків зі сплаву МЛ10 визначали на розривній машині Р5 при кімнатній температурі. Тривалу міцність при різних температурах визначали на розривній машині АІМА 5-2 на зразках діаметром 5 мм згідно до вимог ГОСТ 10145-81.

Для вивчення зварюваності металу термооброблені пластини розміром 200 x 100 x 10 мм зі сплаву МЛ10 зварювали присадним матеріалом у вигляді литих електродів діаметром 8 x 200 мм з цього ж сплаву, що містив скандій 0,06 – 0,07 %. Зварювання проводили аргонно-дуговим способом невитратним вольфрамовим електродом із застосуванням зварювального трансформатора ТД-500, осцилятора ОСПП-3 і баластного реостата РБ-35 при силі струму 140 – 220 А і витраті аргону 14 – 18 л/хв. Для механічних випробувань з урахуванням вимог ГОСТ 6996-66 виготовляли циліндричні зразки діаметром 5 мм так, щоб границя перехідної зони від зварного шва до основного металу знаходилась в середній частині зразків. Вказану межу виявляли травленням реактивом, що складається з 1 % азотної кислоти, 20 % оцтової кислоти, 19 % дистильованої води, 60 % етиленгліколю. Якість зварювального шву контролювали рентгенівським способом.

Мікроструктуру металу вивчали на мікроскопі «Neophot – 32». Мікротвердість структурних складових сплаву визначали на мікротвердомірі фірми «Buehler» при навантаженні 0,1 Н. Мікрорентгеноспектральний аналіз

## Технічна інформація

фаз здійснювали на електронному мікроскопі «JSM-6360LA». Хімічний склад досліджуваних зразків сплаву задовольняв вимогам ГОСТ 2856-79.

Мікроструктура стандартного термообробленого сплаву –  $\delta$ -твердий розчин з евтектикою ( $\delta + \gamma$  ( $\text{MgZr}_{12}\text{Nd}$ )) сферичної форми (рис. 1 а). З підвищенням вмісту скандію в сплаві розміри евтектики збільшувалися (рис. 1 б, в). Так, при введенні в розплав більше 0,07 % Sc розмір евтектичних областей зростає приблизно в 3 рази порівняно зі стандартним сплавом, в той час як розмір зерна матриці ( $\delta$ -фаза) залишався практично на одному рівні (рис. 2).

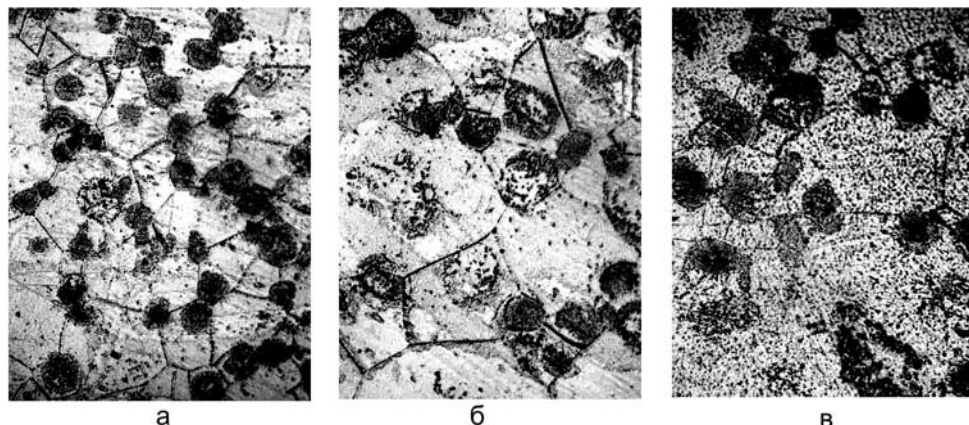


Рис. 1. Мікроструктура термічно обробленого сплаву МЛ10. а – без скандію, б – 0,05 % Sc, в – 1,0 % Sc. x500.

Мікротвердість структурних складових сплаву МЛ10 із зростанням вмісту скандію підвищувалась, як до, так і після термічної обробки. Причому після проведення термічної обробки спостерігали підвищення мікротвердості матриці і зниження мікротвердості евтектики (табл. 1).

Таблиця 1  
Мікротвердість зразків зі сплаву МЛ10 з різним вмістом скандію

| Вміст скандію, % | Мікротвердість, МПа  |           |                         |           |
|------------------|----------------------|-----------|-------------------------|-----------|
|                  | до термічної обробки |           | після термічної обробки |           |
|                  | матриця              | евтектика | матриця                 | евтектика |
| -                | 662,5                | 1916,6    | 1065,7                  | 1320,4    |
| 0,02             | 770,0                | 2089,3    | 1078,8                  | 1480,6    |
| 0,05             | 781,0                | 2094,9    | 1098,8                  | 1504,7    |
| 0,07             | 827,1                | 2125,7    | 1114,4                  | 1735,6    |
| 0,10             | 835,0                | 2158,7    | 1154,5                  | 1891,6    |
| 0,30             | 846,5                | 2211,8    | 1187,4                  | 1930,6    |
| 0,50             | 871,5                | 2285,9    | 1235,5                  | 1985,7    |
| 0,70             | 904,3                | 2348,3    | 1288,4                  | 2130,6    |
| 1,00             | 942,8                | 2450,7    | 1320,5                  | 2211,6    |

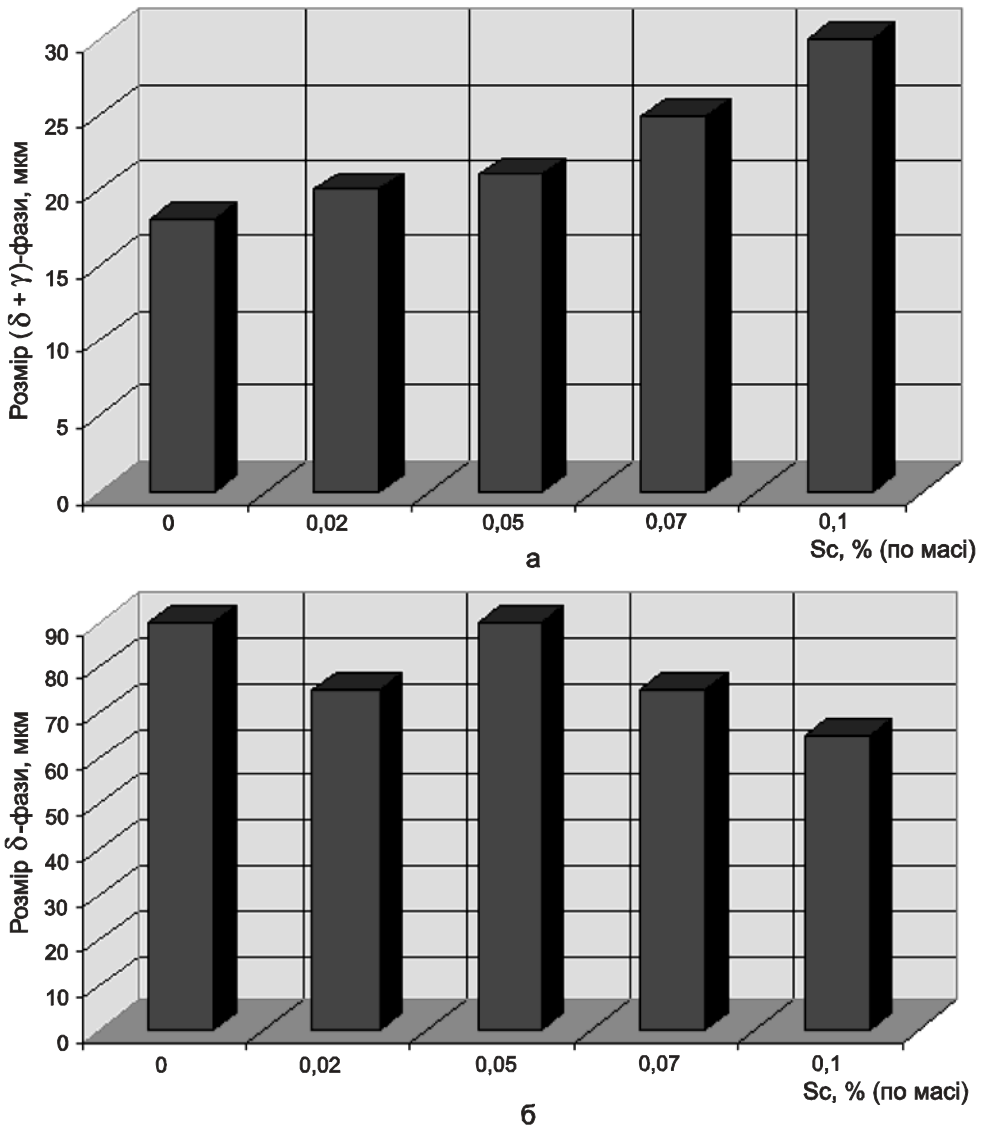


Рис. 2. Розміри структурних складових А сплаву МЛ10 з різним вмістом скандію. а –  $(\delta + \gamma)$ -фаза, б –  $\delta$ -фаза.

Мікрорентгеноспектральний аналіз евтектики показав, що у її складі присутні елементи (% по масі): 0,57 Sc, 1,83 Zr, 4,0 Nd, 0,08 Si, Mg – залишок). При цьому вміст скандію в евтектиці був у ~ 1,5 – 2,0 рази вищий, ніж у  $\delta$ -твердому розчині.

При кількості скандію в сплаві МЛ10 не більше 0,05 % спостерігали підвищення як механічних, так і жароміцних властивостей. Подальше збільшення вмісту скандію в металі знижувало фізико-механічні характеристики матеріалу (табл. 2).

Підвищення температури при випробуванні на тривалу міцність зменшувало час до руйнування. Дисперсні інтерметалідні частинки виділялися

Таблиця 2

Механічні властивості та довготривала міцність сплаву МЛ10 з різним вмістом скандію

| Вміст скандію, % | Механічні властивості |              | Тривала міцність при $\sigma = 80$ МПа, год |                            |                            |
|------------------|-----------------------|--------------|---|----------------------------|----------------------------|
|                  | $\sigma_v$ , МПа      | $\delta$ , % | $T_{\text{вип.}}^* = 150/250$ °С            | $T_{\text{вип.}} = 270$ °С | $T_{\text{вип.}} = 300$ °С |
| 0,00             | 235,0                 | 3,6          | 1252,0/26,2                                 | 47,5                       | 9,0                        |
| 0,02             | 253,0                 | 4,6          | 1252,0/56,0                                 | 53,1                       | 11,1                       |
| 0,05             | 245,0                 | 6,3          | 1252,0/48,7                                 | 71,5                       | 16,0                       |
| 0,07             | 240,0                 | 4,0          | 1252,0/64,0                                 | 61,6                       | 12,4                       |
| 0,10             | 232,0                 | 3,5          | 1252,0/48,0                                 | 36,5                       | 13,4                       |
| 0,50             | 235,0                 | 4,0          | 1251,0/34,1                                 | 24,0                       | 6,7                        |
| 1,00             | 169,0                 | 3,3          | 1252,0/8,0                                  | -                          | -                          |

Примітка: \*) - випробування зразків на тривалу міцність проводили ступінчастим методом: при 150 °С (чисельник), потім при 250 °С (знаменник).

нерівномірно, утворюючи області смугастої структури з підвищеною мікротвердістю, що приводило до руйнування металу (рис. 3).

У структурі зразків, що містять більше 0,07 % Sc, спостерігали грубі приграничні включення, які приводили до швидкого руйнування зразків при їх випробуванні.

Таким чином, вміст в сплаві МЛ10 0,05 – 0,06 % скандію є оптимальним для виготовлення присадочного матеріалу з покращеними властивостями.

Було визначено якісні показники виливків зі сплаву МЛ10, заварених присадним матеріалом з вмістом скандію 0,05 – 0,06 %, включаючи зварний шов і біляшовну область. Структура цієї області характерна для термообробленого сплаву МЛ10. У структурі зварного шва спостерігали  $\delta$ -твердий розчин і  $\gamma$ -фазу, розташовану по межах зерен у вигляді світло-сірих виділень. Розміри структурних складових в зварному шві порівняно з основним металом були помітно менші (табл. 3), а мікротвердість зварного шва трохи вища.

Механічні випробування зразків зі зварним швом показали, що руйнування металу проходило в біляшовній зоні, оскільки метал шва мав дрібнозернисту структуру, зумовлену прискороною кристалізацією.

Промислове випробування присадочного матеріалу сплаву МЛ10 зі скандієм при заварці корпусів компресора низького тиску авіадвигуна

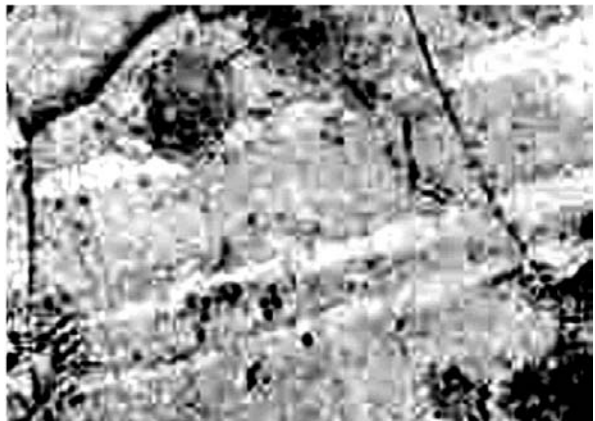


Рис. 3. Нерівномірне виділення вторинної інтерметалідної фази в сплаві МЛ10 з вмістом скандію 0,1 % після ступінчастого режиму випробування. x 750.

Таблиця 3

Розмір структурних складових та механічні властивості в зварному шві зразків зі сплаву МЛ10

| Вміст скандію, %<br>(по масі) | Розмір структурних складових, мкм |           | Механічні властивості |              |
|-------------------------------|-----------------------------------|-----------|-----------------------|--------------|
|                               | матриця                           | евтектика | $\sigma_b$ , МПа      | $\delta$ , % |
| 0                             | 70/34                             | 40/30     | 235/239               | 3,6/3,2      |
| 0,05 – 0,06                   | 60/25                             | 45/35     | 245/253               | 5,6/6,0      |

Примітка: чисельник – основний метал, знаменник – зварний шов.

Д-36 проводили в умовах підприємства АТ «Мотор Січ». На корпусах компресора, що пройшли гарантоване напрацювання льотних годин і надійшли на планове технічне обслуговування, виявляли поверхневі дефекти і проводили попередню підготовку поверхні.

Підготовлені вироби нагрівали до 200 °С в печі протягом 6 годин і заварювали. Заварені деталі знову завантажували у термічну піч і охолоджували разом з піччю до температури не вище 120 °С. Зони заварювання контролювали і зачищали до отримання необхідних геометричних розмірів.

Частина відновлених корпусів компресора була розрізана в місцях заварки для визначення якісних показників металу. Металографічний і рентгенівський контроль показав, що зварний шов та основний метал (рис. 4 а) мали щільну однорідну структуру без будь-яких дефектів. Мікроструктура основного металу була характерною для термообробленого сплаву МЛ10 (рис. 4 б), зварний шов складався з  $\delta$ -твердого розчину і інтерметалідної фази, що містить скандій, цирконій і неодим. При цьому розмір структурних складових в зварному шві був значно меншим, ніж в основному металі. За рівнем механічних властивостей ( $\sigma_b = 230 - 235$  МПа,  $\delta = 3,5 - 4,0$  %) метал шва задовольняв вимоги ГОСТ 2856-79.

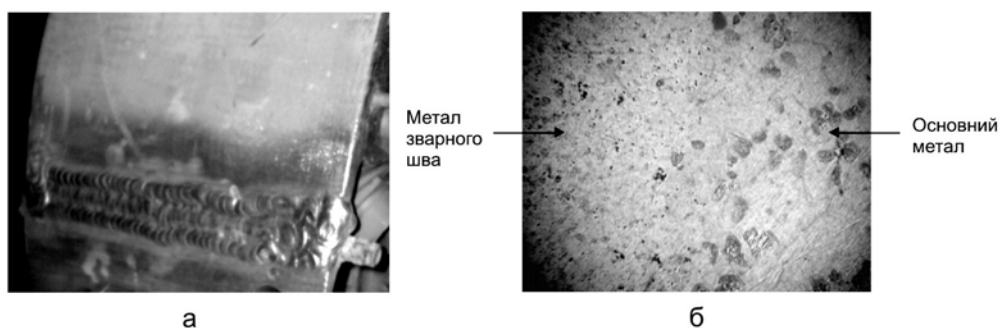


Рис. 4. Елемент корпусу компресора низького тиску авіадвигуна Д-36 після заварки (а) та мікроструктура зони завареного дефекта. а –  $\times 0,1$ , б –  $\times 200$ .

Розроблена технологія заварки поверхневих дефектів корпусів компресора низького тиску авіадвигуна зі сплаву МЛ10 дозволяє відновлювати литі деталі, якісні показники яких задовольняють вимогам нормативно-технічної документації.

Модифікування сплаву МЛ10 скандієм до 0,05 – 0,06 % дозволило отримати дрібнозернисту структуру, підвищений рівень механічних властивостей і тривалої міцності при 250 °С за рахунок утворення комплексних інтерметалідних фаз і мікролегування δ-твердого розчину. Заварка поверхневих дефектів на деталях із сплаву МЛ10 присадним матеріалом, що містить скандій, дозволила отримати щільну однорідну зону сплавлення з підвищеними механічними властивостями. Показана можливість повторного використання дорогих литих деталей авіадвигунів для продовження ресурсу їх роботи.

Промислове випробування на АТ «Мотор Січ» технологічного процесу заварки поверхневих тріщин корпусів компресора низького тиску авіадвигунів Д-36 сплавом МЛ10 зі скандієм дозволило рекомендувати його для відновлення якісних та експлуатаційних нормативних характеристик виливків відповідального призначення [4].

### Література

1. Кривов Г.А., Рябов В.Р., Ищенко А.Я. Сварка в самолетостроении. – Киев: МИИВЦ, 1998. – 695 с.
2. Ищенко А.Я., Лабур Т.М. Свариваемые алюминиевые сплавы со скандием. – Киев: КВЦ, 1999. – 111 с.
3. Альтман М.Б., Белов А.Ф., Добаткин В.И. Технология производства и свойства отливок и деформированных полуфабрикатов. Магниево-алюминиевые сплавы. Т. 2. – М.: Металлургия, 1978. – 295 с.
4. Пат. 25056 Україна, МПК С22С 23/00. Ливарний сплав на основі магнію / Шаломеев В.А., Цивірко Е.І., Жеманюк П.Д. Заявник і патентовласник ВАТ „Мотор Січ”. – № 200702619; заявл. 12.03.07, опубл. 25.07.07. – Бюл. № 11. – 4 с.

Одержано 19.11.12

**В. А. Шаломеев**

### **Восстановление корпусного авиационного литья из сплава МЛ10**

#### **Резюме**

Проведен анализ послеэксплуатационных дефектов авиационного корпусного литья из магниевых сплавов. Разработан и опробован присадочный материал для заварки дефектов корпусных отливок, обеспечивающий высокое качество восстанавливаемых изделий.

**V. A. Shalomeev**

### **Recovery of case aviation casting of ML 10 alloy**

#### **Summary**

The analysis of the defects after operation of case aviation casting of magnesium alloys is done. A filler material for welding defects hall castings, ensuring high quality renewable products is developed and tested.