

УДК 621.771.07

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2021.94.0.85

КОНТРОЛЮВАННЯ СТРУКТУРНОГО СТАНУ ДЕТАЛЕЙ ЦЕНТРОБІЖНИХ КОМПРЕСОРІВ К-250 НА РІЗНИХ ЕТАПАХ ВИРОБНИЦТВА

Протасенко Т. О., Реброва О. М., Шевченко С. М., Федоренко Г. А.
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

***Анотація.** Метою роботи було розроблення методики контролювання деталей центробіжних компресорів К-250 на різних етапах виробництва та вибір оптимального режиму термічного оброблення елементів ротора, виготовлених із конструкційної сталі мартенситного класу марки 34ХН1МА.*

***Ключові слова:** сталь марки 34ХН1МА, вал ротора, робочі колеса, гартування, відпускання, механічні властивості, структура, контролювання якості.*

Вступ

Серед наявних методів забезпечення виготовлення продукції важливе місце посідає вхідне та остаточне контролювання якості металопродукції на виробництві. На підприємстві функції безпосереднього контролювання якості складових частин і загалом готових для використання виробів виконують відділи технічного контролювання (ВТК). Головне завдання вхідного контролювання – постійно забезпечувати необхідний рівень якості, зафіксований у нормативних документах, шляхом безпосередньої перевірки кожної партії металу, який надходить. Успішне вирішення цього завдання може бути здійснене з урахуванням правильного вибору об'єктів і методів контролювання якості.

Необхідність контролювання ресурсів (металів) на вході системи обумовлено тим, що їхня якість значною мірою визначає конкурентоспроможність готового продукту праці. Саме вхідне контролювання металу, який надходить, має попереджувати і не допускати витрат непродуктивного характеру.

Контролювання якості безпосередньо під час виробництва продукції, виготовлення виробу та режимів його оброблення проводиться за допомогою спеціальних контролюючих технічних пристроїв. Застосування активного контролювання дозволяє попереджувати та виявляти брак на початкових стадіях та у виготовлянні готових видів металопродукції.

Контролювання на виході виробничої системи (підприємства та його підрозділів) має за основну мету попереджувати передачу бракованої продукції споживачу або на наступні технологічні фази (стадії) на тому самому підприємстві з наслідками, які з цього впливають. Окрім того, таке контролювання

дає змогу визначити ступінь виконання виробничих завдань та отримати позитивні економічні результати виробництва.

Аналіз публікацій

Ротор компресора призначений для стиснення й переміщення атмосферного повітря. Робочі оберти становлять 10 935 об/хв. Вал ротора зазнає крутіння та змінного вигинання, колеса зазнають великого динамічного навантаження за рахунок великих обертів. Також ротор піддається у певні моменти роботи вібрації, яка може спричинити руйнування коліс або валу.

Матеріалом для відповідальних деталей компресора, таких як вал ротора та робочі колеса, застосовуються леговані сталі. На ТОВ СНВФ «Хіммаш компресор-сервіс» надходять заготовки валу та коліс зі сталі 34ХН1МА згідно з технічними умовами ТУ НЗЛ 341-93, ТУ НЗЛ 342-89.

За умовами ТУ НЗЛ 341-93, ТУ НЗЛ 342-89 вал ротора та робочі колеса зі сталі 34ХН1МА повинні мати певні значення механічних властивостей (табл. 1).

Таблиця 1 – Механічні властивості сталі 34ХН1МА, які повинні мати готові вироби

Властивості	Найменування деталей	
	вал ротора	робочі колеса
Межа міцності, МПа	638	765
Межа плинності, МПа	490	589
Відносне подовження, %	15	14
Відносне звуження, %	35	35
Ударна в'язкість, Дж/см ²	49	49

Високоякісна хромонікельмолібденова сталь 34ХН1МА використовується для відповідальних деталей великих перерізів, особливо в тих випадках, коли вони експлуатуються за умови підвищених температур (до 400 °С), наприклад, диски, вали та ротори турбін; диски, покриття, вали та ротори високонапружених компресорних машин; деталі редукторів, болти, шпильки та ін.

Вплив легувальних елементів на властивості сталі 34ХН1МА такий: хром – підвищує твердість, прогартівність, корозійну стійкість; нікель – підвищує міцність, пластичність, корозійну стійкість; молібден – збільшує червоність, міцність, корозійну стійкість за умови високих температур.

Легування вольфрамом, молібденом також уповільнює процеси знеміцнювання в процесі нагрівання, сприяє отриманню дрібного зерна, знижує поріг холодноламкості, підвищує опір крихкому руйнуванню [1, 2].

У табл. 2 наведений хімічний склад сталі 34ХН1МА.

Таблиця 2 – Хімічний склад сталі 34ХН1МА, % (ТУ 24-1-12-179-75)

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	Cu
0,30–0,4	0,17–0,37	0,50–0,80	1,3–1,7	до 0,025	до 0,025	1,3–1,7	0,20–0,30	до 0,3

Отже, сталь 34ХН1МА має високі механічні властивості, вона належить до мартенситного класу, слабо знеміцнюється за умови нагрівання до 300–400 °С.

Мета і постановка завдання

Завдання цієї роботи – комплексно дослідити якість заготовки деталей ротора центробіжного компресора К-250, а саме вала ротора й робочого колеса, які виготовляються зі сталі 34ХН1МА з метою оцінювання відповідності рівня механічних властивостей тим характеристикам, які необхідні за умовами експлуатації.

Для виконання поставленої мети був проведений комплекс механічних та металографічних досліджень зразків-свідків у вихідному стані та після термічної обробки, вивчені зміни структури та механічних властивостей, що виникають у сталі внаслідок термічного оброблення. Також було проведено неруйнівне контролювання: ультразвукове контролювання на наявність внутрішніх дефектів та капілярне – на наявність поверхневих дефектів [3].

Контролювання структурного стану деталей центробіжних компресорів

Для дослідження було взято по три зразки-свідки від кожної партії поковок та виготовлені зразки для механічних випробувань за стандартною методикою.

Заготовки вала ротора та коліс попередньо були відковані в температурному інтервалі 1240–800 °С, а після кування були відпалені з перекристалізуванням в умовах $t = 880$ °С, охолодження проводилось на повітрі.

На заготовках зі сталі 34ХН1МА, що перебувають у стані постачання, був проведений вхідний контроль. Вхідний контроль містить механічні випробування, металографічне дослідження та неруйнівний контроль.

Для проведення випробувань були вирізані зразки-свідки, на яких визначені межа міцності, межа плинності, відносне подовження, поперечне звуження, ударна в'язкість та твердість. Була розглянута металографічна структура. Дані цих показників наведені в табл. 3–4.

Деталі ротора К-250 – вал та робочі колеса – виготовлені зі сталі 34ХН1МА, згідно з ТУ замовника повинні мати механічні властивості, наведені в табл. 1. Перевірки механічних властивостей на зразках-свідках, проведені в процесі контролювання, показали рівень міцності й пластичності, наведений у табл. 3.

Порівнюючи дані табл. 1 і 3, можна зробити висновок, що в стані постачання характеристики міцності сталі 34ХН1МА не відповідають вимогам: основні параметри міцності (межа міцності, межа плинності) значно нижчі, ніж необхідно мати в цій сталі згідно з ТУ.

Таблиця 3 – Механічні властивості деталей компресора зі сталі 34ХН1МА у стані постачання

Властивості	Найменування деталей	
	вал ротора	робочі колеса
Межа міцності, МПа	594,74	611,2
Межа плинності, МПа	467,93	476,10
Відносне подовження, %	25,45	25,76
Відносне звуження, %	31,43	25,15
Ударна в'язкість, Дж/см ²	322,77	229,81
Твердість, МПа	2 290	2 370

Після механічних випробувань зразки-свідки передаються для проведення металографічних досліджень.

Під час макроскопічного аналізування дефектів, які порушують суцільність металу, або яких-небудь інших недоліків виявлено не було.

У процесі мікроскопічного аналізування спочатку проводилось досліджування нетравленого шліфа для виявлення неметалевих домішок, а потім шліф піддавався хімічному травленню для виявлення мікроструктури.

Оцінювання неметалевих домішок проводилося за «методом Ш» за п'ятибальною шкалою під час збільшення на мікроскопі $\times 100$. Середній бал підраховується як середнє арифметичне максимальних оцінок кожного зразка для кожного виду вкраплень. Результати досліджень наведені в табл. 4.

Таблиця 4 – Вміст неметалевих домішок зразків-свідків деталей компресора зі сталі 34ХН1МА у стані постачання, згідно з ДСТУ ISO 4967:2017 (ISO 4967:2013, IDT)

Властивості	Найменування деталей	
	вал ротора	робочі колеса
Сульфіди	4/4	4/2
Силікати не деф.	4/-	4/-
Силікати крихкі	4/3	4/2
Оксиди точкові	4/1	4/1
Оксиди рядкові	4/-	4/-

Примітка: у числівнику наведена допустима величина неметалевих домішок у балах, у знаменнику – фактична величина неметалевих вкраплень у балах

Неметалеві вкраплення можуть потрапити з вихідних шихтових матеріалів, і навіть під час плавлення внаслідок процесів окислення, розкислення, знесірчення тощо. Значна частина з них є оксидами, сульфідами, нітридами, силікатами. До неметалевих вкраплень належать також частинки шлаку, що залишилися в металі, вогнетривких матеріалів печі або розливних пристроїв [4].

Як впливає з наведених даних у табл. 4, за вмістом неметалевих вкраплень різного типу сталь відповідає вимогам ДСТУ ISO 4967:2017 (ISO 4967:2013, IDT). Як максимальний, так і середній бал не перевищено за жодною позицією, а за деяким виявлена повна відсутність вкраплень (наприклад, недеформовані силікати, рядкові оксиди).

На рис. 1 наведений вигляд рядкового сульфїду в заготовці для валу, який відповідає 4 балу, а на рис. 3 – сульфїд у заготовці для

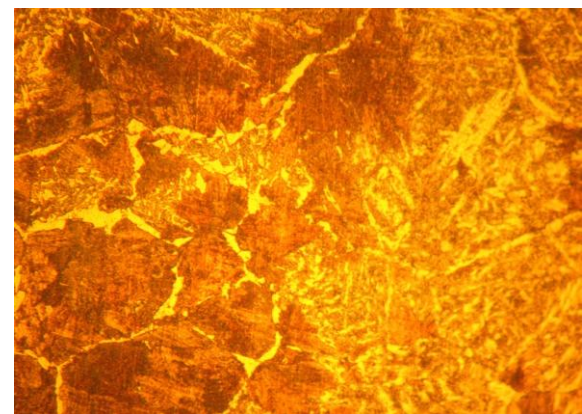
робочого колеса, який відповідає 2 балу шкали.



збільшення $\times 250$

Рис. 1. Неметалеві вкраплення у валі ротора зі сталі 34ХН1МА (сульфїди, 4 бал)

Мікроструктура сталі 34ХН1МА, виявлена після травлення щавелевою кислотою, наведена на рис. 2 та 4. Структура складається з фериту та перліту, до того ж кількість структурного складника – перліту – більша, ніж вільного фериту. Середній розмір перлітних колоній становить 30–60 мкм для валу, та 10–25 мкм для колеса; ферит переважно розміщується по межах перлітних зерен. Така мікроструктура характеризується досить невеликою міцністю.



збільшення $\times 250$

Рис. 2. Мікроструктура валу ротора зі сталі 34ХН1МА у стані постачання

Також на заготовках робочих колес і валу ротора була проведена ультразвукова дефектоскопія для виявлення внутрішніх дефектів. У процесі контролювання дефекти, які перевищують допустимі норми згідно з ГОСТ 24507-80, не виявлено.

Як було вказано вище, за результатами контролювання властивості металу не відповідають вимогам ТУ НЗЛ 341-93, ТУ НЗЛ 342-89. Тому для отримання необхідних ме-

ханічних властивостей потрібно провести термічне оброблення (поліпшення): гартування + високе відпускання.



збільшення $\times 250$

Рис. 3. Неметалеві вкраплення в робочих колесах зі сталі 34XN1MA (сульфіди, 2 бал)

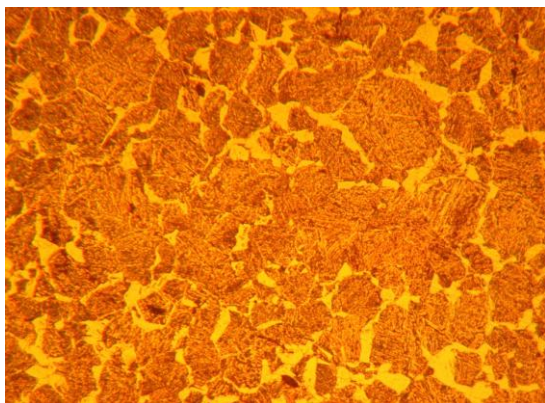
У нашому випадку необхідно було зміцнити сталь, тому вона піддавалась обробленню за таким режимом:

– гартування за умови температури 860°C , час витримування 1 год, середовище охолодження – олива;

– відпускання за умови температури 660°C , час витримування 1,5 год, середовище охолодження – повітря.

Після термічного оброблення виконується контролювання структури і властивостей, яке проводиться на зразках-свідках [5, 7].

Результати механічних досліджень сталі 34XN1MA після термооброблення наведені в табл. 5.



збільшення $\times 250$

Рис. 4. Мікроструктура робочих коліс зі сталі 34XN1MA в стані постачання

Аналізуючи дані механічних досліджень, можна зробити висновок, що термічне обро-

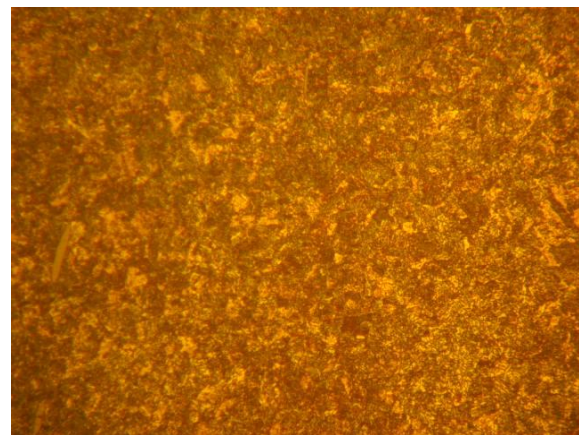
блення позитивно вплинула на властивості сталі. Межа плинності збільшилась майже на 60 %, межа міцності на 50 % і перевищує показники, необхідні від цієї сталі.

Таблиця 5 – Механічні властивості деталей компресора зі сталі 34XN1MA після термічного оброблення

Властивості	Найменування деталей	
	вал ротора	робочі колеса
Межа міцності, МПа	949,19	991,28
Межа плинності, МПа	790,65	913,16
Відносне подовження, %	26,05	25,64
Відносне звуження, %	62,48	44,0
Ударна в'язкість, Дж/см ²	91,23	49,26
Твердість, МПа	2 850	2 950

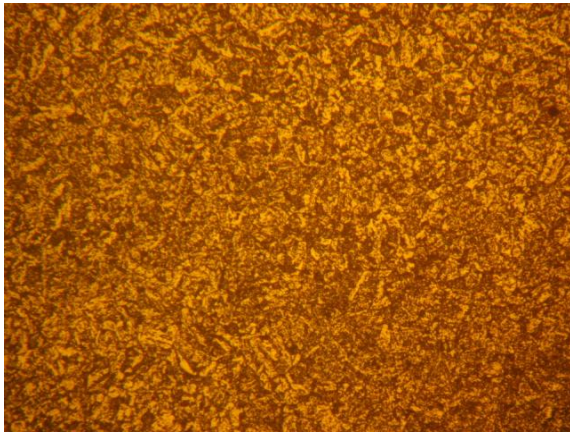
Твердість знаходиться в заданому інтервалі, а характеристики пластичності й опору динамічним навантаженням (відносне подовження, поперечне звуження, ударна в'язкість) теж вищі за необхідні значення. Отже, цей режим термічного оброблення є оптимальним і забезпечує отримання необхідних властивостей.

На рис. 5 наведена мікроструктура сталі 34XN1MA після поліпшення. Сорбіт відпускання, який утворився після термічного оброблення, має досить дисперсну будову і добре співвідношення міцності та пластичності. У такому стані матеріал піддається механічному обробленню. Аналогічну морфологію структури після термічного оброблення мають зразки сталі 34XN1MA, з яких будуть виготовлені робочі колеса (рис. 6).



збільшення $\times 100$

Рис. 5. Мікроструктура вала ротора зі сталі 34XN1MA після термічного оброблення



збільшення $\times 100$

Рис. 6. Мікроструктура робочих коліс зі сталі 34XN1MA після термічного оброблення

Після остаточного механічного оброблення деталей була проведена капілярна дефектоскопія для виявлення поверхневих дефектів. У процесі контролювання дефектів, що порушують суцільність поверхні, не виявлено.

Висновки

1. Згідно з результатами вхідного контролювання макроструктура, а також наявність неметалевих вкраплень у сталі 34XN1MA відповідають вимогам.
2. У стані постачання механічні властивості сталі 34XN1MA нижчі за потрібні згідно з ТУ.
3. Мікроструктура сталі 34XN1MA у стані постачання відповідає відпаленому стану.
4. Запропонований режим поліпшення сталі 34XN1MA є оптимальним і забезпечує механічні властивості, які перевищують показники, що позначені в ТУ.
5. Проведення зміцнювального термічного оброблення деталей центробіжних компресорів К-250 за цим режимом не призводить до утворення поверхневих гартівних тріщин, що підтверджено контролюванням методом капілярної дефектоскопії.

Література

1. Гуляев А.П. *Металловедение: учебник.* – Москва: Металлургия, 1986. – 544 с.
2. Смирнов Н.А. *Современные методы анализа и контроля продуктов производства: учебник для металлург. спец. вузов.* – Москва: Металлургия, 1985. – 255 с.
3. *Лаборатория металлографии: учеб. пособ. / Панченко Е.В. и др.; ред. Б. Г. Лившиц.* – Москва: Металлургия, 1965. – 440 с.
4. Рахманкулов М.М., Парасченко В.М. *Технология литья жаропрочных сплавов.* – Москва: Интермет Инжиниринг, 2000. – 464 с.
5. *Материалы в машиностроении. Выбор и применение: справочник в 5 т. / Богданов Н.А. и др.; общ. ред. И.В. Кудрявцев.* Т. 2: Кон-

струкционная сталь; ред. Е.П. Могилевский. – Москва: Машиностроение, 1967. – 496 с.

6. Воронова О.І. Курс лекцій з дисципліни «Контроль якості виливків» для студентів спеціальності 6050402 «Ливарне виробництво» / уклад. О.І. Воронова. – Одеса: ОНПУ, 2012. – 129 с.
7. Сушенцева Л.Л., Чорна В.В., Чорний С.В. *Матеріалознавство в машинобудуванні: електронний посібник.* – Харків: СМІТ, 2008.

References

1. Gulyaev A.P. (1986). *Metallovedenie [Metallurgy]*. Moskva: Metallurgy [in Russian].
2. Smirnov N.A. (1985). *Sovremennyye metody analiza i kontrolya produktov proizvodstva [Modern methods of analysis and control of production products]*. Moskva: Metallurgy [in Russian].
3. Panchenko E.V., Skakov Yu.A., & Krimer B.I. et al (1965). *Laboratoriya metallografii [Metallography laboratory]*. Moskva: Metallurgy [in Russian].
4. Rahmankulov M.M., Paraschenko V.M. *Tehnologiya litya zharoprochnyih splavov (2000). [Casting technology of heat-resistant alloys]*. Moskva: Intermet Inzhiniring [in Russian].
5. Bogdanov N.A., Burova N.I., & Golub L.V. et al (1967). *Materialy v mashinostroenii. Vybor i primeneniye [Materials in mechanical engineering. Selection and application] I.V. Kudryavtsev (Ed.) (Vol. 1–4)*. Moskva: Mashinostroenie [in Russian].
6. Voronova O.I. *Kurs lektzii z dystsypliny «Kontrol yakosti vylyvkiv» [Course of lectures on the discipline "Quality control of castings"]*. Odesa: ONPU.
7. Sushentseva L.L., Chorna V.V., Chorny S.V. (2008). *Materialoznavstvo v mashinobuduvanni [Materials science in mechanical engineering]*. Kharkiv: SMIT.

Протасенко Тетяна Олександрівна, доцент кафедри матеріалознавства, тел.: (057) 707–64–35, e-mail: 290954protas@gmail.com

Реброва Олена Михайлівна, к.т.н., доцент кафедри матеріалознавства, тел.: (057) 707–64–35, e-mail: rebrovaem0512@gmail.com

Шевченко Світлана Михайлівна, к.т.н., старший викладач кафедри матеріалознавства, тел.: (057) 707–64–35, e-mail: svsshev970819@gmail.com

Федоренко Ганна Анатоліївна, інж. I кат. кафедри матеріалознавства, тел.: (057) 707–64–35, e-mail: ann161169@gmail.com

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

Monitoring the structural condition of parts of K-250 centrifugal compressors at different stages of production

Abstract. Problem. Among the existing methods of ensuring the production of goods, an important place is occupied by the input and final quality control of metal products in production. The main task of the input control is to constantly ensure the necessary level of quality, fixed in regulatory documents, by directly checking each batch of supplied metal. The use of active quality control directly during the production of goods allows to prevent and detect defects at the initial stages and during the manufacture of finished types of metal products. Control at the output of the production system has the main purpose to prevent the transfer of defective products to the consumer or to the subsequent technological phases (stages). **Goal.** The goal is development of methods for monitoring the parts of K-250 centrifugal compressors at various stages of production and selection of the optimal mode of heat treatment of rotor elements made of structural steel of the martensitic class of the 34KHN1MA brand. **Method.** The control included mechanical tests, metallographic studies of blanks and finished parts, as well as non-destructive testing for internal defects and surface quality. **Results.** A comprehensive input control of the macro- and microstructure, as well as the mechanical properties of blanks made of 34KHN1MA steel was carried out. A mode of improving the prop-

erties of critical parts of a centrifugal compressor made of 34KHN1MA steel by heat treatment is proposed. Control of the finished product was carried out, including mechanical tests, microstructure studies, as well as non-destructive surface quality control.

Key words: 34KHN1MA grade steel, rotor shaft, impellers, quenching, tempering, mechanical properties, structure, quality control.

Protasenko Tetiana Oleksandrivna, Associate Professor of Materials Science Department, tel.: (057) 707-64-35,

e-mail: 290954protas@gmail.com

Rebrova Olena Mykhailivna, Ph. D., Associate Professor of Materials Science Department, tel.: (057) 707-64-35, e-mail:

rebrovaem0512@gmail.com

Shevchenko Svitlana Mykhailivna, Senior Lecturer of Materials Science Department,

tel.: (057) 707-64-35,

e-mail: svsshev970819@gmail.com

Fedorenko Anna Anatolyevna, eng. I category of Materials Science Department,

tel.: (057) 707-64-35,

e-mail: ann161169@gmail.com

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kyrpychova str., 2, Kharkiv, 61002, Ukraine.
