

## ВИЯВЛЕННЯ ПРИЧИН РУЙНУВАННЯ ГВИНТОВОГО КОМПРЕСОРА ВВП-5/8

*В.О. Пчелінцев, канд. техн. наук, доцент;  
Т.П. Говорун, канд. фіз.-мат. наук, асистент;  
В.М. Раб, ст. викладач;  
О.П. Шумко, студент,  
Сумський державний університет, м. Суми*

*Під час аналізу зруйнованих приводних валів гвинтового компресора ВВП-5/8 визначені можливі причини їх виходу з ладу та розроблені рекомендації, що дозволяють збільшити їх працездатність і термін експлуатації за рахунок оптимізації структурного стану матеріалу.*

### ВСТУП

Компресор - пристрій для стиснення і подачі повітря або іншого газу під тиском. За принципом дії та основними конструкційними особливостями розрізняють компресори поршневі, гвинтові (ротаційні), відцентрові, осьові й струменеві. Кожний із перелічених типів також підрозділяється на ряд категорій залежно від призначення, конструкції, потужності та інших параметрів. Крім того, компресори прийнято розділяти ще і за виглядом приводу, як такі можуть використовуватися двигуни внутрішнього згорання, газові турбіни або електродвигуни. Компресори можуть бути призначені для стиснення різних середовищ: у цьому відношенні їх розподіляють на газові – для стиснення кисню, азоту або пропан-бутану і повітряні, які використовують для постачання стисненим повітрям різного технологічного устаткування та інструменту. І, нарешті, залежно від умов експлуатації, конструктивного виконання і габаритів, компресори можуть бути переносними, пересувними або стаціонарними [1-3]. На сьогодні у промисловості найбільш поширені поршневі і гвинтові (ротаційні) компресори.

Поршневі компресори є найпоширенішими в Україні серед використовуваних компресорів із продуктивністю до 100 м<sup>3</sup>/хв. Основними перевагами поршневих компресорів є їх помітно нижча вартість у порівнянні з компресорами інших типів, відносна простота виробництва, висока ремонтоздатність. Отже, для випадків, коли потрібні невелика (до 200 м<sup>3</sup>/хв) продуктивність і високий (вище 20-30 атмосфер) тиск, поршневі компресори ефективніші й набагато дешевші, ніж компресори інших технологій стиснення, за винятком турбокомпресорів, які ефективні при великих потребах у стисненому повітрі [2].

Гвинтові компресори відрізняються від традиційних поршневих принципом роботи. Якщо в поршневому компресорі відбувається ударне стиснення повітря, то гвинтовий компресор нагнітає повітря плавно, за допомогою гвинтової пари. Гвинтова пара засмоктує повітря, обертаючись у масляній ванні, що забезпечує практично повну відсутність тертя, додаткове масляне ущільнення, що гарантує герметичність системи, а також ефективне тепловідведення від робочої зони. В результаті - високий ККД (~92%) і незначне підвищення температури (на 10-15°С) стисненого повітря порівняно з температурою на вході. Високі експлуатаційні характеристики й ефективна система масляного охолодження забезпечують цілодобовий режим роботи гвинтового компресора при оптимальній температурі. При цьому система масловідділення, передбачена в стандартній комплектації гвинтових компресорів, забезпечує вміст масла на виході всього 1-3 мг/м<sup>3</sup>.

Порівняно з поршневими гвинтові компресори володіють цілим рядом переваг: мають низький рівень шуму і вібрації, малі габарити й вагу і можуть встановлюватися безпосередньо в цехах, де споживається повітря; не вимагають для цього спеціального фундаменту; практично не мають витрати масла, на відміну від габаритних поршневих компресорів, відтак проводять значно чистіше повітря, що дозволяє використовувати їх для живлення найсучаснішого пневмообладнання; оснащені автоматичною системою управління і контролю працездатності, а тому безпечні, не вимагають спостереження за їх роботою, мають велику надійність, здатні на тривалу роботу без обслуговування; повітряне охолодження гвинтових компресорів дозволяє відмовитися від громіздкої системи оборотного водопостачання і, крім того, дає можливість вторинного використання тепла, що виділяється в результаті роботи компресора, наприклад для обігрівання приміщень у зимовий час; період безремонтного пробігу для гвинтових компресорів на порядок довший, ніж для стандартних поршневих компресорів; гвинтові компресори не потребують спеціально навченого персоналу, який постійно стежив би і обслуговував їх; гвинтові компресори більш економічні, споживають менше електроенергії; можливість безперервної роботи 24 години на добу [2-3].

Останніми роками спостерігається тенденція широкого впровадження гвинтових компресорів у різні галузі промислового виробництва з метою забезпечення споживачів у стиснутому повітрі [3].

Однак під час експлуатації часто спостерігається вихід із ладу гвинтових компресорів з причини руйнування валу привода (рис. 1), який з'єднаний із вмонтованим редуктором.

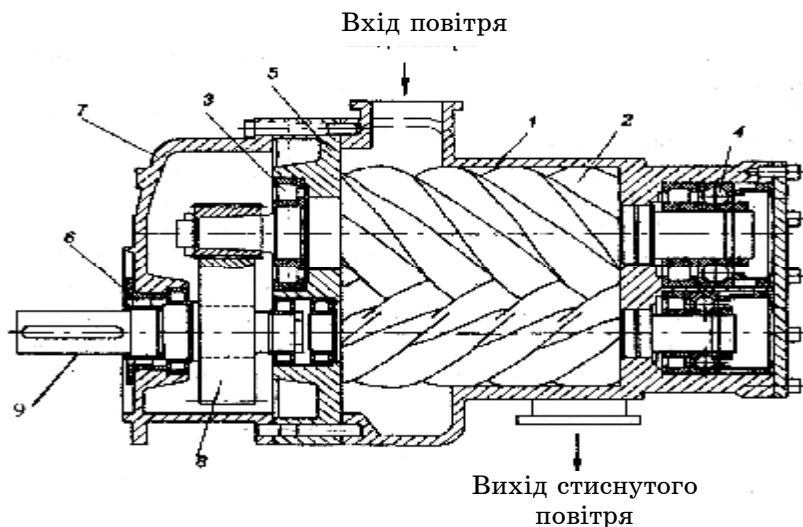


Рисунок 1 - Гвинтовий компресор: 1 - корпус роторної пари; 2 - роторна пара; 3 - роликопідшипник; 4 - шарикопідшипник; 5 - корпус підшипника; 6 - ущільнення; 7 - фланець; 8 - редуктор; 9 - вал привода

## 1. ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ПРИНЦИП ДІЇ ГВИНТОВОГО КОМПРЕСОРА

Сьогодні промисловістю виробляється безліч типів гвинтових компресорів, проте всіх їх можна об'єднати у дві конструктивні групи: з одинарним гвинтом і подвійним. До особливостей компресорів гвинтового типу слід віднести також і те, що ці машини залежно від конкретної моделі забезпечують деяку фіксовану міру стиснення. Заданий ступінь стиснення (робочий тиск) забезпечується геометричними параметрами

камери стиснення. Вироблювані сьогодні гвинтові компресори, як правило, мають декілька фіксованих ступенів стиснення, які можуть оперативнo вибиратися (перемикатися) споживачем залежно від своїх потреб.

Для забезпечення необхідності у стиснутому повітрі підприємств промисловості, транспорту, будівництва застосовують компресорні машини різних типів, так звані компресори загального призначення, які забезпечують компримування атмосферного повітря до тиску 0,6-1,0 МПа (6-10 кгс/см<sup>2</sup>) із частотою обертання 6000 об/хв. Залежно від необхідної величини (необхідних розмірів), характеру діяльності підприємства, продукції, яка випускається, та інших факторів використовуються компресори різних типів: динамічного стиснення (осьові, центробіжні), об'ємного стиснення (поршневі, гвинтові, пластинчасті) [3].

Гвинтовий компресор (рис. 1) - це нескладний прилад із невеликою кількістю основних деталей. Він складається із чавунного корпусу, виготовленого литтям, з торцевими кришками, ведучого та віденого ротора із гвинтовою нарізкою, опорних та упорних підшипників. У гвинтових компресорах відсутні клапани, а також частини, які виконують обернено-поступальні рухи.

Основними деталями компресора є ротори, на циліндричній поверхні яких нарізані гвинти із спеціальним профілем зубців. Профілі гвинтової нарізки на роторах різні: на одному із них виконуються западини, а на іншому – виступи. Їх профілі підбираються таким чином, щоб при взаємному обкатуванні роторів відбувався збіг виступів та западин із мінімальними зазорами.

Гвинтовий компресор є машиною об'ємної дії. Стиснення повітря у ньому відбувається за рахунок зменшення об'єму повітря, що всмоктується, затиснутого між зубцями гвинтів, корпусом і, нагнітаючою торцевою стінкою. Стиснення відбувається до того часу, поки при відповідному кутовому положенні роторів стиснутий об'єм повітря не з'єднається із нагнітальним отвором у торцевій стінці. Таким чином, затиснуте повітря безперервно порціями потрапляє у нагнітаючий патрубок. Очевидно, що витрата і тиск повітря будуть залежати в першу чергу від розмірів і форми гвинтової пари і частоти їх обертання.

## 2 ВИЗНАЧЕННЯ ПРИЧИНИ ВИХОДУ З ЛАДУ ГВИНТОВОГО КОМПРЕСОРА ВВП - 5/8

### 2.1 Результати зовнішнього огляду зруйнованого компресора

Після експлуатації двох компресорів ВВП-5/8 (закордонне виконання; повітряно-гвинтова пересувка; 5 – продуктивність установки, м<sup>3</sup>/хв; 8 – тиск на виході, атм.) даного типу відбулося аварійне зупинення через 370 годин і через 280 годин.

Аналіз конструктивного виконання компресора показує, що він піддавався зовнішнім циклічним навантаженням з боку привода. Найнебезпечнішою деталлю при виході із ладу компресора є вал привода, на який діє момент крутіння і знакозмінні напруги вигину від консольного навантаження. При цьому напруги крутіння розподіляються нерівномірно по тій частині вала, довжина якої дорівнює 50 мм (рис. 2). Безпосередньо на довжині 37 мм, де розташовується внутрішній отвір  $d=12$  мм, полярний момент інерції більше у декілька разів, ніж на іншій довжині вала (рис. 2).

У технічній документації підприємства, що експлуатує дані компресори, було зафіксовано причину, яка призвела до дострокового зупинення приладу. Воно пов'язане з виходом із ладу вала привода компресора, що з'єднаний з редуктором (рис. 1).



матеріалу на хвостовику вала сприяє зміні напрямку руху розвитку тріщини й утворенню зони доламування, яка формується у вигляді конічної поверхні (рис. 4).

## 2.2 Аналіз структури і властивостей матеріалу

Для визначення структури і властивостей матеріалу, з якого виготовлений вал привода, було використано методи дослідження механічних властивостей, структури, твердості, ударної в'язкості та визначення хімічного складу.

Для аналізу мікроструктури були виготовлені мікрошліфи із зруйнованої частини вала. Досліди проводилися з використанням мікроскопа НЕОРНОТ-21. У результаті аналізу було визначено структуру сталі, яка складає механічну суміш фериту ( $\Phi$ ) і перліту ( $\Pi$ ) (рис. 5) з нерівномірним розподілом по перерізу, що характеризується наявністю смугастості.

Забруднення неметалевими включеннями сталі відповідно до ГОСТ 1778 - 90 такі: оксиди, силікати – 3-й бал; сульфіди – 2-й бал. Окрім того, у сталі зустрічаються великі поодинокі включення пластинчастих силікатів.

Величина зерна відповідає – 8-му балу (ГОСТ 5639-82) (рис. 6а). Мікротвердість досліджуваного зразка вимірювалася приладом ПМТ-3 при навантаженні 100 грамів і склала: для фериту за результатами вимірювання п'яти відбитків –  $H_{100}=210$  кГс/мм<sup>2</sup>, для перліту –  $H_{100}=280$  кГс/мм<sup>2</sup>. Окрім того, у зоні формування внутрішнього отвору діаметром 12 мм з використанням механічної обробки, такої, як свердління, було встановлено (рис. 6б), що поверхневий шар структури металу характеризується деформацією зерен фериту й перліту в напрямку дії переміщення інструменту.

Визначення хімічного складу матеріалу проводилося з використанням прилада «СПЕКТРОМАХ, для чого було підготовлено відповідні зразки. Твердість за Бринелем визначалася на приладі ХПД-250.

Результати досліджень мікроструктури та аналізу хімічного складу матеріалу дозволяють стверджувати, що для виготовлення вала привода компресора ВВП-5/8 використовувалася якісна сталь 45 із вмістом вуглецю до 0,45% [5-6].

Для визначення механічних властивостей матеріалу вала привода виготовлялися стандартні зразки з робочим діаметром 6 мм. Випробування проводилися на машині ИМ-4Р із записом діаграми деформації в масштабі 1:100. Результати механічних випробувань наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Механічні властивості сталі

Марка матеріалу	Умовна межа текучості $\sigma_{0,2}$ , МПа	Межа міцності $\sigma_B$ , МПа	Від-носне подовження $\delta$ ,%	Від-носне звуження $\psi$ ,%	Ударна в'язкість $KCU^{+20}$ , МДж/м <sup>2</sup>	Ударна в'язкість $KCU^{-20}$ , МДж/м <sup>2</sup>	Твердість $HВ$ , кГс
У вихідному стані							
Сталь 45	375-378	676-680	25	46-47	4,2	2,9	190-210
Після проведення термообробки (термополіпшення)							
Сталь 45	387-388	637-639	26-27	69-70	16-17	-	202-207

Ударну в'язкість визначали на зразках типу Шарпі за ГОСТ 9454-78 з U-подібним надрізом ( $KCU$ ) на приладі КМ-30. Результати цих досліджень наведені в таблиці 1. Випробування проводилися при температурі  $\pm 20^\circ\text{C}$ . За результатами випробувань можна відзначити, що сталь 45 має здатність до крихкого руйнування при незначній зміні температури.

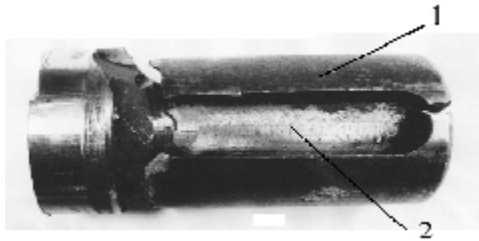


Рисунок 3 – Поверхня шпонкового паза після механічного оброблення:  
1 – хвостовик вала; 2 – шпонковий паз

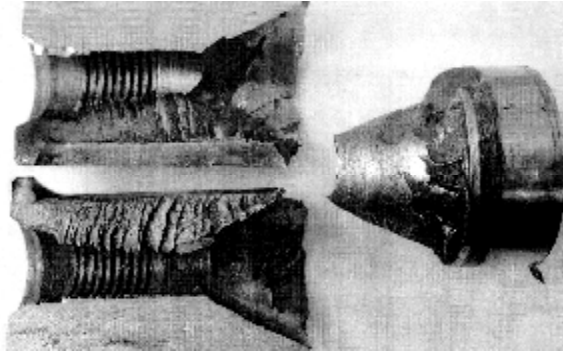
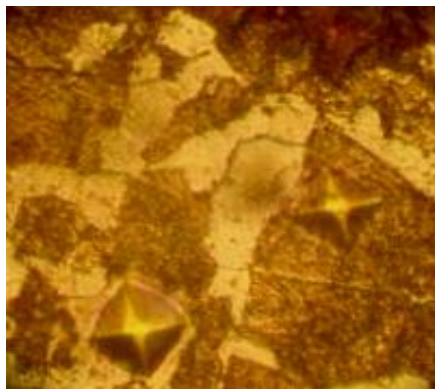
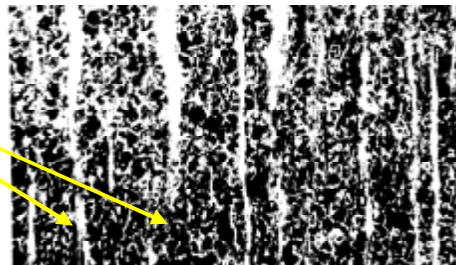
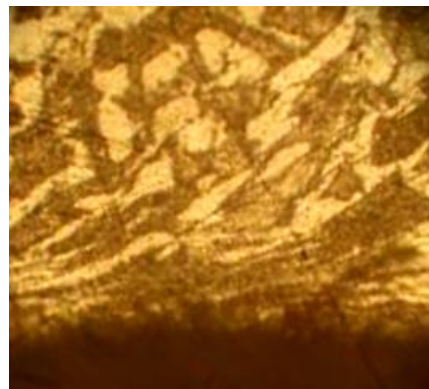


Рисунок 4 – Зона кінцевого руйнування (доламування) матеріалу в зоні наявності внутрішньої різьби (зоні В) вала привода

Рисунок 5 – Мікроструктура сталі зруйнованого вала (Ф+П) з наявністю смугастості:  
Ф – структура фериту,  
П – структура перліту



а



б

Рисунок 6 – Мікроструктура та мікротвердість складових сталі Ф+П (темні зони – перліт; світлі – ферит) (а) і деформація складових структур у зоні формування отвору з використанням механічної обробки (б)



*a*



*б*



*в*



*г*

*Рисунок 8 – Знімки зруйнованих зразків після випробування на ударну в'язкість: а – загальний вигляд зразків у вихідному стані; б – після рекомендованої термообробки; в, г – зони злому*

За станом мікроструктури, визначеннями механічних властивостей, бала зерна було встановлено, що для сталі, з якої виготовили вал привода компресора ВВП-5/8, було застосовано такий режим термообробки, як нормалізація.

### **2.3 Вплив режимів термообробки на властивості сталі**

З метою усунення смугастості матеріалу було проведено додатковий аналіз структури та властивостей сталі після термічної обробки, що передбачає гартування при температурі  $T = 850-860^{\circ}\text{C}$  і високий відпуск (термополіпшення) при температурі  $T = 550^{\circ}\text{C}$ , яка дозволяє формувати структуру сорбіт-відпуску.

Для вирішення цієї задачі були виготовлені зразки з визначення механічних властивостей з використанням того ж обладнання та типорозмірів, що і для попередніх випробувань матеріалу у вихідному стані.

На рисунку 7 наведено знімки зруйнованих зразків після випробування на ударну в'язкість. Величина стріли прогину досліджуваних зразків покаже, що після проведеної термічної обробки сталь 45 має більше значення опору виникнення і розвитку тріщини. Результати випробувань наведені в таблиці 1.

### **ВИСНОВКИ**

1 У результаті проведеного аналізу встановлено, що передчасний вихід з ладу компресора ВВП-5/8 відбувся через руйнування вала привода під дією малоциклічного втомного механізму.

2 Причиною руйнування вала привода виявився нерівномірний розподіл зовнішньої дії навантаження на кінцеву частину вала – хвостовик, що

обумовлений наявністю шпонкового паза при довжині хвостової частини 50 мм та внутрішнього отвору діаметром 12 мм на довжину 37 мм.

3 Структура матеріалу має підвищену крихкість внаслідок смугастості й низьких значень ударної в'язкості.

4. Геометричні параметри шпонкового паза виконані не відповідно до вимог креслення (галтель і шорсткість поверхні), що збільшує концентрацію напруг у зазначених місцях відповідно.

5. На підставі отриманих результатів можна запропонувати таке:

– матеріал для виготовлення вала зі сталі 45 варто піддавати операції гартування при  $T = 850-860^{\circ}\text{C}$  і високому відпуску при  $T = 550^{\circ}\text{C}$  (термополіпшенню), що дозволить істотно підвищити опір виникненню та розвитку тріщини;

– бажано зменшити геометричний розмір діаметра внутрішньої різьби до М8 і довжину отвору до 25 мм;

– дотримуватися вимог креслення й ГОСТ при механічній обробці поверхонь вала привода;

– враховуючи можливість використання даної установки в різних кліматичних умовах, доцільно використовувати середньовуглецеві низьколеговані поліпшовані сталі, наприклад: 40ХН, 40ХНМ [5], які мають підвищені значення механічних властивостей.

## SUMMARY

### IDENTIFICATION OF THE REASONS OF SCREW COMPRESSOR GDP-5/8 FAILURE

*V.A. Pchelyntsev, T.P. Hovorun, V.N. Rab, E.P. Shymko*  
Sumy State University, Sumy

*At the analysis of the blasted drive shafts of screw compressor GDP-5/8 there were identified possible reasons of their failure and developed recommendations to increase their efficiency and lifetime due to the optimization of the structural state of material.*

**Key words:** *screw compressor, mechanical properties, microstructure, heat treatment, shock viscosity*

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бондаренко Г.А. Винтовые воздушные компрессорные станции / Г.А. Бондаренко. – Сумы: Изд-во СумГУ, 2005. – 255 с.
2. <http://photo.mebeleron.com/articles/Stroitiel-stvo/-1105.html>.
3. <http://www.pneumatic.com.ua/uk/comps/>.
4. Фрактография и атлас фрактограмм/ Под ред. Дж. Феллоуза. – М.: Металлургия, 1982. – 490 с.
5. Сорокин В.Г., Волосникова А.В., Вяткин С.А. и др. Марочник сталей и сплавов / Под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
6. Металлография железа. Том.1. Основы металлографии (с атласом микрофотографий) / Перев. с англ. - М: Металлургия, 1972. - 240 с.

*Надійшла до редакції 1 березня 2010 р.*