

**Ключові слова:** газодинамічна стійкість роботи повітря-реактивного двигуна, кінематичний аналіз

Are considered the drawbacks of modern theory of air-jet engines, which are connected with mistaken fundamental theorem of the raising force of blowing profile, calculated by professor N.Y. Gukovsky in 1912 year, with mistaken fundamental formulars of thrust and flying (thrust) efficiency, calculated by academician B.S. Stechkin in 1929 year.

**Keywords:** gasodynamic steady work of air-jet engines, kinematical analyse.

**УДК 621.81.004.62/.63**

**С. М. ПОПОВ**, д-р фил. наук, проф., ЗНТУ, Запоріжжє

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗАЛИШКОВОГО АУСТЕНИТУ ТА ТВЕРДОЇ НАДЛИШКОВОЇ ФАЗИ НА ЗНОСОСТІЙКОСТЬ НАПЛАВЛЮВАЛЬНИХ СПЛАВІВ**

Подано дослідження впливу метастабільною залишкового аустеніту та твердої надлишкової фази гетерогенних наплавлювальних сплавів на здатність опиратися абразивному руйнуванню в умовах напівзакріпленого абразиву. Проаналізовано залежність масової частки мартенситу від величини напружень деформації. Розглянуто та систематизовано порядок проведення побудови багатокритеріальної математичної моделі трибосистеми на базі активного експерименту. Приведено результат дослідження впливу хімічного складу наплавленого матеріалу на зносостійкість.

**Ключові слова:** дисипація, залишковий аустеніт,  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворення, попередня деформація, надлишкова фаза, рівняння регресії, еталон, поверхні відгуку, зносостійкість.

**Введення.** Сплави з високою початковою твердістю взагалі мають більшу зносостійкість, але виключенням з цього загального правила є сплави, у структурі яких утворюється значна кількість залишкового аустеніту. У процесі зношування таких сталей з метастабільною аустенітною структурою під впливом енергії абразивних зерен на поверхні тертя може відбуватися утворення мартенситу деформації [1,2].

Цей процес тісно зв'язаний з перерозподілом витрат енергії, тобто її дисипацією, яка здійснює запуск механізмів, що зміцнюють робочу поверхню деталей, що зношуються. В тому ж разі, не зовсім ясно коли і як, за яких умов може відбуватися реальне підвищення зносостійкості та що треба робити у випадках коли цього не трапляється. Складність прогнозу оптимального структурно-фазового стану наплавлювального сплаву, по перше обумовлено складним механізмом абразивної руйнації, а по друге також пов'язана з причиною відсутності чітких критеріїв і методів, за якими можна достовірно оцінювати здатність матеріалів до опору зношуванню, посилаючись на його фізико-механічні властивості, хімічний склад та структуру металу. Тому задача вивчення впливу залишкового аустеніту та твердої надлишкової фази на зносостійкість наплавлювальних сплавів є дуже актуальною та нагальною науковою проблемою.

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Чутливість до адаптації сталей і сплавів до зовнішніх механо-енергетичних впливів, що приводять до мартенситного ( $\gamma \rightarrow \alpha$ ) перетворення, залежить від температури мартенситної точки, що у значній мірі визначається вмістом вуглецю і легуючих елементів у твердому розчині [1,2]. Утворення мартенситу деформації супроводжується складним зрушенням у кристалічній ґратці метастабільного аустеніту. При зовнішньому силовому впливі в процесі зношування метал робочої поверхні отримує енергію, необхідну для ( $\gamma \rightarrow \alpha$ ) перетворення [3]. Значний вплив на зміцнення аустеніту, його стабільність відносно динамічних деформаційних мартенситних перетворень і, відповідно, властивості сплавів з нестабільним аустенітом здійснює попередня холодна та тепла пластичні деформації. В залежності від режиму їх проведення вони можуть стабілізувати чи дестабілізувати аустеніт і неоднозначно впливати на властивості [5]. Для зменшення кількості аустеніту та

його стабільності використовують такі технологічні прийоми: зниження температури нагріву під загартування; обробка холодом; старіння для виділення фаз; деформація для отримання дефектів упаковки, невеликої кількості мартенситних фаз та збіднення аустеніту легуючими елементами [4].

**Мета та задачі дослідження.** Мета та задачі дослідження в даній роботі полягають у вивченні впливу метастабільною залишкового аустеніту та твердої надлишкової фази гетерогенних наплавлювальних сплавів на здатність опиратися абразивному руйнуванню в умовах напівзакріпленого абразиву. Систематизувати та відпрацювати порядок проведення побудови багатокритеріальної математичної моделі трибосистеми на базі активного експерименту. Відтворити математичні рівняння впливу хімічного складу, твердості і кількості зміцнюючої фази наплавленого металу на зносостійкість.

**Експериментальні дані та їх обробка.** При абразивному зношуванні напівзакріпленим абразивом немає чітко вираженого характеру механізму руйнування, оскільки частка постійно змінює своє положення у просторі, чергуючи різальні грані, площу контакту, кут атаки, під яким відбувається взаємодія з поверхнею тертя. У результаті чого механізм зношування складається з мікролокальних навантажень, пластичного деформування і мікрорізання. Основне значення має властивість матеріалу опиратися впровадженню та переміщенню по поверхні тертя абразивних часток. Цей комплекс характеристик визначається опором металу пружним і пластичним деформаціям. Показовою характеристикою при цьому є агрегатна твердість сплаву, а також твердість його окремих структурних складових, початкових, та конче важливих здобутих в процесі спрацьовування після контактної взаємодії. Тому за параметр оптимізації прийнято відносну зносостійкість  $\varepsilon$ , твердість наплавленого металу HRC та кількість зміцнюючої фази, %. А в якості основних незалежних факторів було обрано: вміст вуглецю, марганцю та бору в наплавленому металі. Еталоном була обрана сталь 45 у відпаленому стані. Відносна зносостійкість даної сталі:  $\varepsilon = 1,00$ . Середні значення масової частки елементів у наплавленому металі та результати експерименту наведені в табл. 1.

Таблиця 1 - Середні значення масової частки елементів у наплавленому металі та результати експерименту

№	Назва сплаву	Середня масова частка елементів у наплавленому металі, %					HRC	Фазовий склад, %				Відносна зносостійкість, $\varepsilon$	Кількість зміцнюючої фази, %
		C	Cr	B	Si	Mn		До випробувань		Після випробувань			
								$\alpha$	$\gamma$	$\alpha$	$\gamma$		
1	ЭН-ИТС-01	3,50	14	0,50	-	-	60	75	25	90	10	5,90	65
2	КБХ-45	2,30	14	1,90	-	0,36	65	90	10	95	5	6,20	70
3	ЭН Т-620	3,25	14	1,20	2,20	1,10	55	65	35	80	20	5,60	55
4	ЭН Т-590	2,75	14	1,50	0,65	1,30	52	90	10	100	-	5,40	50
5	ПП-АН104	1,80	14	0,50	3,00	0,60	50	60	40	65	35	3,60	15
6	ЭН-180Х14РЗ	1,60	14	3,00	-	-	63	70	30	75	25	7,10	65
7	ПП-Х12Ф1	1,35	14	0,50	1,93	0,65	45	50	50	60	40	2,15	12
8	ПП-АН170	1,00	14	2,70	0,60	0,65	61	45	55	60	40	6,50	50

Таблиця 2 - Результати статистичної перевірки рівнянь регресії.

Для рівняння	Критерій Кохрена		Критерій Фішера		Довірчий інтервал $\pm \Delta b_{ij}$	Дисперсія	
	$G_{p \text{ розр}}$	$G_{t \text{ табл}}$	$F_{p \text{ розр}}$	$F_{t \text{ табл}}$		Адекватності, $S_{ад}^2$	Відтворюваності, $S_v^2$
$\varepsilon$	0,22	0,68	0,24	5,32	0,21	0,062	0,259
HRC	0,30	0,68	0,74	5,32	24,53	22,41	30,00
K	0,52	0,68	0,07	5,32	13,90	1,238	17,00

Таким чином, в результаті обробки результатів матриці планування експерименту після проведення перевірки, внаслідок статичного характеру залежностей, були отримані наступні адекватні рівняння регресії:

$$\begin{cases} \varepsilon = 0,695 + 1,47C + 2,36B - 2,07Mn - 0,64CB + 0,546CMn + 0,573BMn - 0,208CBMn \\ HRC = 38,7 + 5,8C + 7,6B - 5,77Mn - 1,66CB + 0,846CMn + 3,46BMn - 1,69CBMn \\ K = -39,25 + 29,5C + 33,5B + 3,808Mn - 9CB - 2,846CMn - 4,154BMn + 0,31CBMn \end{cases} \quad (1)$$

де С – масова доля вуглецю, %; В – масова доля бору, %; Mn – масова доля марганцю, %.

Для вивчення всього факторного простору впливу легуючих елементів С, В і Mn на фізико-механічні властивості сплавів були побудовані просторові діаграми (поверхні відгуку) взаємного впливу хімічного складу для відносної зносостійкості  $\varepsilon$  (рис. 1).

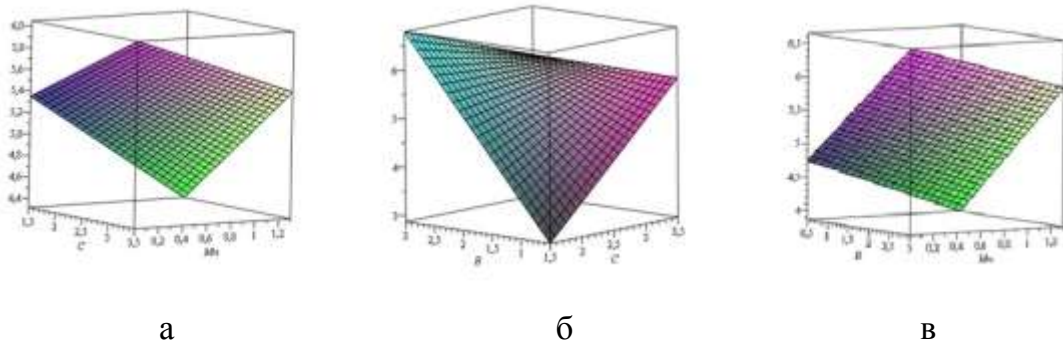


Рис. 1 – Залежність відносної зносостійкості при постійному вмісті бору - а, марганцю – б, та вуглецю - в.

Як можемо побачити, мартенситне перетворення протікає дуже слабо і є майже незначним. Підвищена стабільність аустеніту, в порівнянні з оптимальною, знижує опір руйнуванню, що пояснено тим, що в даному випадку мартенситні перетворення не можуть в необхідному ступені забезпечити релаксацію напружень і витрати енергії зовнішньої взаємодії.

Аналіз залежності масової частки мартенситу від величини напружень деформації (рис. 2) показав, що спочатку спостерігається збільшення масової частки мартенситу пропорційно напруженням деформації матеріалу. Подальше підвищення напружень на ділянці В-С викликає незначне підвищення масової частки мартенситу деформації. І при збільшенні напружень більше 20 МПа вміст мартенситу деформації на поверхні матеріалу практично не росте. В цій області можуть бути відтворені небезпечно великі напруження, які здатні спровокувати руйнування металу. Збільшення деформацій вище критичних завжди буде викликати руйнування матеріалу.

Таким чином нам необхідно забезпечити такі напруження деформації,

що не перевищують напруження, відповідні точці С, і входять в інтервал В-С. При високих температурах у зоні контактування відтворення мартенситу деформації буде ускладнене, тому в подальшому використовують гетерогенні зносостійкі сплави, що мають багату кількість зміцнюючої фази.

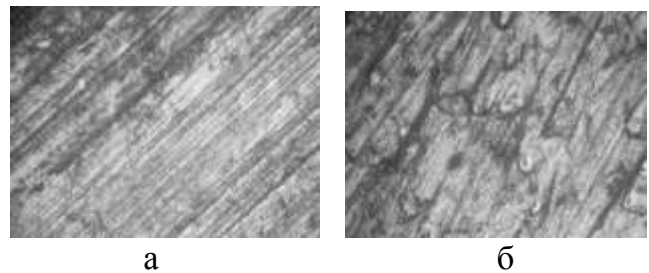


Рис. 2 - Характер руйнування поверхні тертя після зношування напів-закріпленням абразивом, а - ПП-Х12Ф1(з залишковим нестабільним аустенітом) х 100, б - ПП-АН170 (з надлишковою твердою фазою) х 200

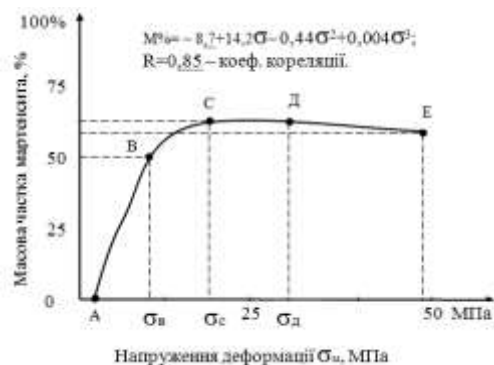


Рис. 3 – Залежність масової частки мартенситу від напруження деформації

**Висновки.** Було встановлено, що для реалізації математичного моделювання трибосистеми на базі багатофакторного активного експерименту дослідження адаптації матеріалів в умовах зношування закріпленим та напівзакріпленим абразивом найбільш підходять стандартні матеріали типу Х12 та Х12Ф1, які мають в залежності від температури термічної обробки (гартування) широкий діапазон стуктурно-фазового стану (від фериту, перліту, мартенситу, проміжних структур та залишкового аустеніту) з різною кількістю зміцнюючої фази (карбідів), властивості яких є добре вивченими в умовах інтенсивного абразивного руйнування, щоб простежити рефлексію шляху зміни цих матеріалів.

Доведено, що в умовах зношування напівзакріпленим та незакріпленим абразивом, який має значну мікротвердість 12...16 ГПа, мартенситне перетворення залишкового аустеніту протікає дуже слабо і є майже незначним. Тому дослідження показали що підвищена стабільність аустеніту, в порівнянні з оптимальною, знижує опір руйнуванню, що пояснено тим, що в даному випадку мартенситні перетворення не можуть в необхідному ступені забезпечити релаксацію напружень і витрати енергії зовнішньої взаємодії. Виходячи з чого, доведено що треба застосовувати адаптацію матеріалів за рахунок зміцнення матриці твердими включеннями значної мікротвердості приблизно 19...22 ГПа: карбідами, борідами, інтерметалідами та ін..

За результатами математичної обробки та аналізу було вперше отримано математичні регресії у вигляді поліному з парними та потрійними факторами взаємодії для умов зношування напівзакріпленим абразивом. Показано, що головними факторами впливу на зносостійкість, твердість і кількість зміцнюючої фази є вміст вуглецю, марганцю та бору в наплавленому металі.

Аналіз даних, при порівнянні початкової і кінцевої кількості залишкового аустеніту показав що відбувається його зниження. У той же час ступінь цього зміцнення при самих сприятливих умовах, коли об'єм перетворень нестабільного аустеніту максимальний, все ж таки не забезпечує достатньо високої мікротвердості. Тому нами було встановлено, що використання нестабільної аустенітної структури у поєднанні з мартенситом і зміцнюючою твердою фазою є оптимальним рішенням.

Дослідження показало, що дуже важливим є керування в сплавах структурою та розвитком мартенситних перетворень, бо це дозволить значно покращити їх технологічні властивості. Але процес наукових пошуків і доказів цих явищ вимагає більш глибокого вивчення.

**Список літератури:** 1. Попов С. М. Триботехнічні та матеріалознавчі аспекти руйнування сталей і сплавів при зношуванні.: Навчальний посібник / С. М. Попов, Д. А. Антонюк В. В. Нетребко. – Запоріжжя: ЗНУ, ВАТ «Мотор Січ», 2010. – 368 с. 2. Сорокин В. М., Курников А. С. Основы триботехники и упрочнения поверхностей деталей машин. Курс лекций. – Н.: Новгород: ВГАВТ, 2006. – 296 с. 3. Д. Н. Гаркунов. Триботехника. Конструирование, изготовление и эксплуатация машин. Учебник. 5-е изд. перераб. доп. 2007. 4. М. М. Тененбаум. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании. - М.: Машиностроение, 1966. – 332 с. 5. Малинов Л. С. Ресурсосбережение за счет применения экономнолегированных сплавов и упрочняющих технологий, обеспечивающих получение многофазных метастабильных структур и управление структурными и фазовыми превращениями (обзор)/ Л. С. Малинов, В. Л. Малинов // Нові матеріали та технології в металургії та машинобудуванні – 2011. – № 1. – Запоріжжя. – С. 93–105.

*Надійшла до редколегії 20.03.2013*

УДК 621.81.004.62/.63

**Дослідження впливу залишкового аустеніту та твердої надлишкової фази на зносостійкість наплавлувальних сплавів / Попов С. М // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХПІ», – 2013. - № 1 (977). – С. 10-14. – Бібліогр.:5 назв.**

Представлены исследования влияния метастабильного остаточного аустенита и твердой избыточной фазы гетерогенных наплавленных сплавов на способность сопротивляться абразивному разрушению в условиях полужакрепленного абразива. Проанализирована зависимость массовой доли

мартенсита от величины напряжений деформации. Рассмотрены и систематизированы порядок проведения построения многокритериальной математической модели трибосистемы на базе активного эксперимента. Приведены результаты исследования влияния химического состава наплавленного материала на износостойкость.

**Ключевые слова:** диссипация, остаточный аустенит,  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения, предыдущая деформация, избыточная фаза, уравнение регрессии, эталон, поверхности отклика, износостойкость.

Filed studying the influence of metastable retained austenite and hard excess phase heterogeneous fusion alloy's ability to resist abrasive deterioration in napivzakriplenoho abrasive. The dependence of the mass fraction of martensite on the magnitude of the stress deformation. Considered and systematized procedure for constructing multi trybosystemy mathematical model based on the active experiment. The results of studying the influence of the chemical composition of the deposited material for durability.

**Keywords:** dissipation, residual austenite,  $\gamma \rightarrow \alpha$  transformation, the previous deformation, excessive phase, regression equation, standard, response surface, durability.

## УДК 621.9.06

**О. С. КРОЛЬ**, канд. техн. наук, проф., Восточноукраинский Национальный Университет им. В.Даля, Луганск;

**А. А. КРОЛЬ**, ст. преп., Восточноукраинский Национальный Университет им. В.Даля, Луганск;

**Е. И. БУРЛАКОВ**, студент, Восточноукраинский Национальный Университет им. В.Даля, Луганск

### **ТВЕРДОТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА**

Рассматривается процедура комплексного моделирования и исследования формообразующего шпиндельного узла обрабатывающего центра сверлильно-фрезерно-расточного типа с использованием инструментария построения 3D-моделей в САПР КОМПАС. Приведен анализ напряженно-деформированного состояния в САПР SolidWorks.

**Ключевые слова:** шпиндель, 3D- модель, поля перемещений, конечно-элементная сетка.

**Введение.** Шпиндельные узлы (ШУ) обрабатывающих центров представляют собой сложные механическую систему, состоящую из упругих элементов различных типов, объединенных в единую конструкцию формообразующего узла станка и являющуюся объектом моделирования и исследования. Выделяют ряд существенных факторов [1,2], влияющих на процесс создания рационального варианта шпиндельного узла. К ним относятся ряд

конструкторско-технологических характеристик: компоновка узла; геометрия, входящих в него деталей; свойства материалов деталей (модуль упругости, плотность, коэффициент демпфирования и др.); осевые натяги подшипников и способы их создания и другие. Кроме того, на принятие решений проектировщика влияют технологические характеристики: погрешности деталей (разноразмерность, шероховатость, отклонение от круглости и др.) и погрешности сборки. Наконец, немаловажно влияние условий эксплуатации (внешние нагрузки, параметры смазки, теплопроводность и др.).

Между входными и выходными данными существуют количественные соотношения, определяющие комплексную математическую модель ШУ, исследование которой можно осуществлять в среде различных систем автоматизированного проектирования.

#### **Анализ основных достижений и публикаций**

Исследовать влияние входных факторов на конструкцию шпинделя целесообразно с помощью интегрированных САПР. Построению комплексной математической модели ШУ предшествует выбор САПР, в которой будет осуществляться 3D-моделирование и исследование свойств проектируемого объекта. Существует ряд требований к системам