

УДК 621.785.532

Анализ технологии изготовления деталей кулачкового механизма

Смирнов Андрей Евгеньевич^{1*}

smirnoff@bmstu.ru

SPIN-код: 1912-6568

Фомина Людмила Петровна^{1,2}

fominalp@yandex.ru

SPIN-код: 4368-6929

Сапронов Илья Юрьевич³

ilia-ilich@yandex.ru

SPIN-код: 5202-5125

Али Али¹

alia1@student.bmstu.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

² ПК «Салют» АО «ОДК», Москва, Россия

³ АО «Туполев», Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрена возможность изготовления деталей кулачкового механизма на основе результатов анализа технологии изготовления аналогичных импортируемых деталей. Показано, что замена сталей и режима предварительной термической обработки обеспечит получение более высоких прочностных характеристик и регламентированных значений ударной вязкости, что обеспечит большую надежность и срок службы деталей.

Ключевые слова: автоматные стали, хромистые стали, микроструктура, микротвердость, микрорентгеноспектральный анализ, диффузионный слой, азотирование

Technological analysis of cam mechanism part fabrication

Smirnov Andrey Evgenievich^{1*}

smirnoff@bmstu.ru

SPIN-код: 1912-6568

Fomina Lyudmila Petrovna^{1,2}

fominalp@yandex.ru

SPIN-код: 4368-6929

Sapronov Ilya Yuryevich³

ilia-ilich@yandex.ru

SPIN-код: 5202-5125

Ali Ali¹

alia1@student.bmstu.ru

¹ BMSTU, Moscow, Russia

² PK Salyut JSC UEC, Moscow, Russia

³ JSC Tupolev, Moscow, Russia

Abstract. The study examines the feasibility of manufacturing cam mechanism components based on analysis of production technology for similar imported parts. It is demonstrated that substituting steel grades and modifying the pre-heat treatment regime will yield higher strength characteristics and regulated impact toughness values, thereby ensuring greater reliability and extended service life of the components.

Keywords: free-cutting steels, chromium steels, microstructure, microhardness, micro X-ray spectral analysis, diffusion layer, nitriding

Введение. Развитие и модернизация технологий современной отечественной промышленности является одной из многих причин импортозамещения в современном машиностроении. Принципиально новые технологии расширяют возможности отечественного производства, способствуют росту эффективности и ведут к повышению конкурентоспособности на внутреннем рынке. В данной работе представлен анализ технологии изготовления деталей импортируемого кулачкового механизма, состоящего из эксцентричного кулачкового вала, вращающегося в подшипниках скольжения. Цель исследования состоит в определении состава материала деталей кулачкового механизма и вида термической и поверхностной обработки. Актуальность работы заключается в подборе аналогов используемым материалам и разработке технологии термической и химико-термической обработки при изготовлении аналогичных деталей.

Методы и материалы. Исследуемые детали представляют собой: вал (рис. 1, а) — тело вращения с эксцентричными цилиндрическими поверхностями различного диаметра и участком в виде кулачка; втулка (рис. 1, б) — тело вращения с соосными цилиндрическими поверхностями с упорным фланцем. Рабочие поверхности характеризуются низкой шероховатостью.



Рис. 1. Внешний вид деталей: кулачковый вал (а) и втулка — подшипник скольжения (б)

Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе Olympus GX-51 при увеличении от 200 до 500 крат.

Определение химического состава проводили методом атомно-эмиссионного спектрального анализа с применением оптико-эмиссионного спектрометра QSH-750 фирмы OBLF в соответствии с ГОСТ Р 54153-2010. Анализировали состав сердцевины деталей.

Микротвердость измеряли по ГОСТ 9450-76 на полированной поверхности шлифов до металлографического травления на микротвердометре DURASCAN-70 при нагрузке 100 г. За число твердости принимали среднее

значение не менее 5 измерений. Электронно-микроскопические исследования и микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа SU3500 оснащенного энергодисперсионным спектрометром Oxford Aztec. Использовали детектор X-Мах кремний-дрейфового типа с разрешением 127 эВ (по линии Mn K α 1). Полуколичественную оценку химического состава фазовых составляющих выполняли при ускоряющем напряжении 10 и 15 кВ путем зондирования участка поверхности микрошлифа в пределах поля зрения при увеличениях 650 и 1400 крат. Относительная ошибка полуколичественной оценки элементного состава не превышала 1 %.

Результаты. Анализ химического состава (табл. 1) показал возможные марки сталей: вал изготовлен из стали марки DIN 1.0718 или AISI 12L14; втулка — из стали марки DIN 1.0762. Ближайшие российские аналоги — сернистомарганцовистые свинецсодержащие стали по ГОСТ 1414–75 [1]: AC14 (вал) и AC45Г2 (втулка).

Таблица 1

Химический состав деталей (масс. %)

Деталь	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Pb	Fe
Вал	0,0638	0,0202	1,48	0,0242	0,291	0,14	0,0942	0,0407	0,242	0,213	осн.
Втулка	0,402	0,116	1,46	0,0281	0,237	0,0717	0,0824	0,0141	0,114	0,125	осн.

Микроструктура вала в поперечном направлении (рис. 2, а) представляет собой вариант типичной структуры низкоуглеродистой автоматной стали после нормализации — в поперечном сечении заметны равномерно распределенные в ферритной матрице колонии перлита и округлые включения сульфидов марганца MnS. Среднее значение микротвердости сердцевины вала (180 ± 20 HV0,1) характерно для низкоуглеродистой стали после горячей пластической деформации или нормализации. В приповерхностной зоне вала присутствует тонкий (11–13 мкм) сплошной слой избыточной фазы и диффузионный слой толщиной около 120 мкм, представляющий собой ферритную матрицу с пограничными и игольчатыми выделениями избыточной фазы. Характерные особенности структуры дают возможность предположить наличие на поверхности вала азотированного слоя.

Микроструктура втулки в продольном направлении (рис. 2, б) представляет собой вариант типичной структуры среднеуглеродистой автоматной стали после горячей пластической деформации и нормализации — хорошо заметна полосчатость ферритно-перлитной структуры, сетка феррита и вытянутые в направлении пластической деформации включения сульфидов марганца MnS. Среднее значение микротвердости сердцевины втулки (275 ± 25 HV0,1) характерно для среднеуглеродистой стали после нормализации. Аналогичный сплошной слой избыточной фазы (толщиной 12–14 мкм) зафиксирован в микроструктуре приповерхностной зоны втулки; при этом диффузионный слой незаметен, возможно он маскируется полосчатой структурой ферритно-

перлитной матрицы. Можно предположить наличие на поверхности втулки азотированного слоя.

Анализ распределения микротвердости $HV_{0,1}$ по толщине приповерхностной зоны вала (рис. 3, а) подтверждает наличие диффузионного слоя толщиной около 120 мкм с микротвердостью около 300 $HV_{0,1}$ и более твердого (до 580 $HV_{0,1}$) поверхностного слоя, очевидно, соответствующего слою избыточной фазы на рис. 2, а.

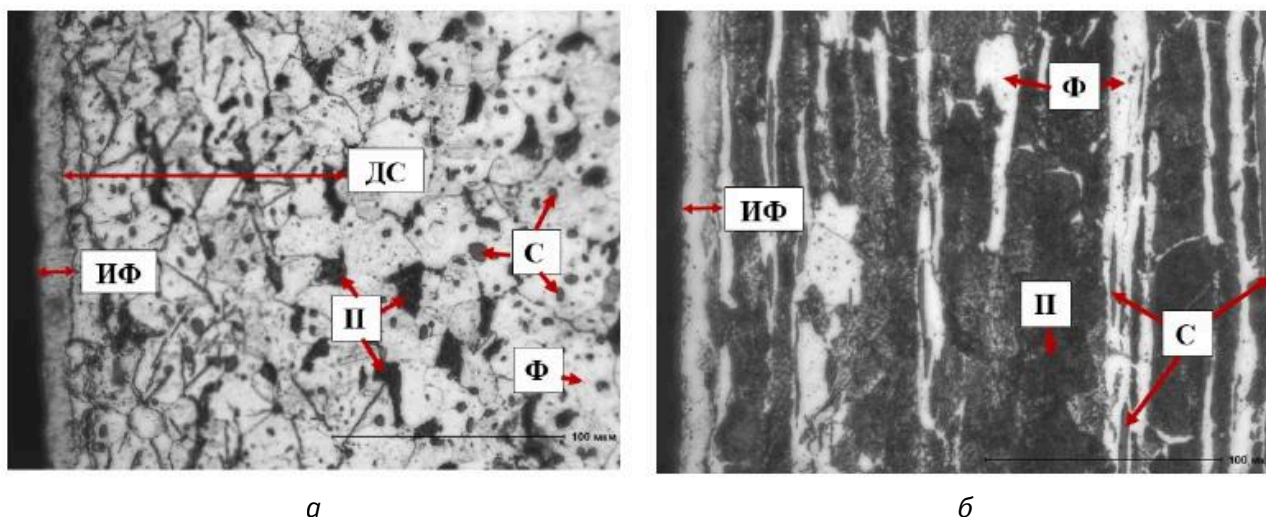


Рис. 2. Микроструктура сердцевины и приповерхностной зоны деталей:

а — вал в поперечном направлении, $\times 500$; б — втулка в продольном направлении, $\times 500$; Ф — феррит; П — перлит; С — сульфиды марганца; ИФ — избыточная фаза; ДС — диффузионный слой

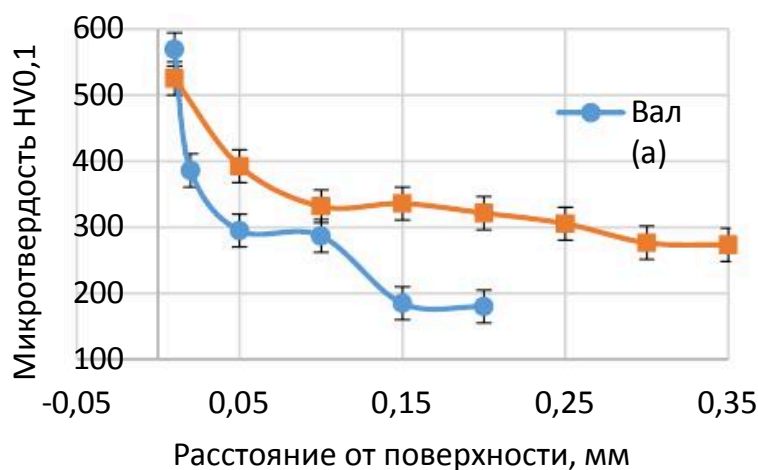


Рис. 3. Распределение микротвердости $HV_{0,1}$ по толщине приповерхностной зоны вала (а) и втулки (б)

Аналогичное распределение микротвердости $HV_{0,1}$ получено по толщине приповерхностной зоны втулки (рис. 3, б). Зафиксирован диффузионный слой толщиной около 200 мкм с микротвердостью 300–350 $HV_{0,1}$ и поверхностный слой с микротвердостью до 530 $HV_{0,1}$. При этом избыточная

фаза в диффузионном слое практически не фиксируется; в микроструктуре (рис. 2, б) заметен только сплошной слой избыточной фазы. МРСА сердцевины подтверждает наличие в структуре большого количества неметаллических включений на основе марганца и серы MnS (рис. 4, а). Химический состав в зонах анализа 1 и 2 (масс. %) приведен в табл. 2 и показывает состав включения MnS (спектр 1) и металлической матрицы (спектр 2).

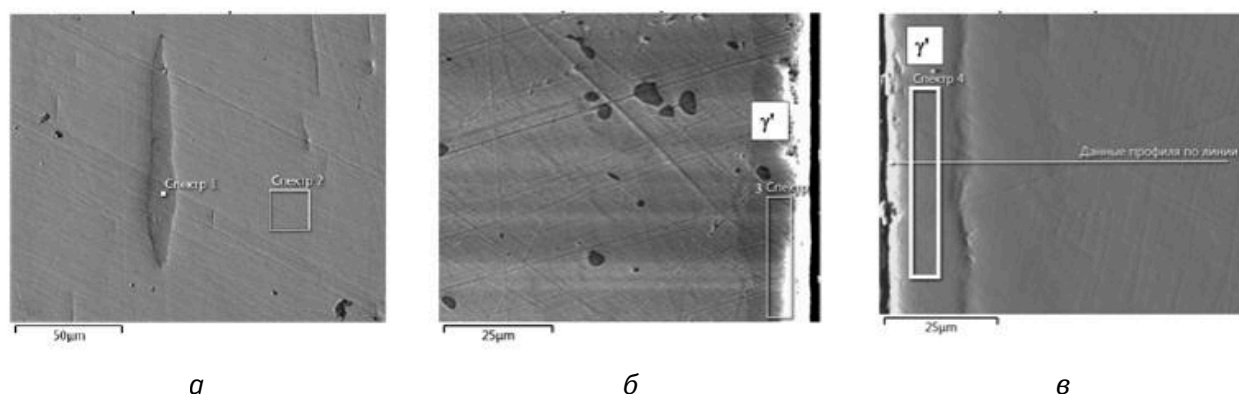


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение структуры сердцевины втулки (а), приповерхностного слоя вала (б) и втулки (в)

Электронно-микроскопические изображения структуры приповерхностного слоя вала (рис. 4, б) и втулки (рис. 4, в) показывают наличие на поверхности деталей сплошных слоев избыточной фазы толщиной около 15 мкм, обогащенных азотом. Результаты МРСА (табл. 2 спектр 3 и 4) показывают концентрацию азота в названных слоях вала — 4,77 и втулки — 3,58 масс. %, что свидетельствует о формировании на поверхности деталей сплошных слоев γ' нитрида на основе железа с микротвердостью 580 HV0,1 и 530 HV0,1 соответственно.

Таблица 2

Химический состав зон анализа (масс. %)

Элемент	Спектр 1	Спектр 2	Спектр 3	Спектр 4
N	–	–	4,77	3,58
S	34,2	0,8	0,06	0,16
Mn	63,2	2,3	0,91	1,22
Fe	2,6	96,8	94,25	95,05
Сумма	100,0	100,0	100,00	100,00

В микроструктуре диффузионного слоя вала (рис. 4, б) заметны пограничные и игольчатые выделения избыточной фазы — γ' нитрида; при этом диффузионный слой втулки можно обнаружить только по увеличенной интенсивности сигнала азота по толщине (линия 1, рис. 4, в). Наличие на по-

верхности деталей сплошного слоя γ' нитрида с повышенной твердостью способствует повышению износостойкости пары трения вал-втулка.

Обсуждение полученных результатов. Основная область применения конструкционных сталей повышенной обрабатываемости резанием (автоматных сталей) — массовое производство деталей с большим объемом лезвийной обработки при использовании станков-автоматов [2]. Существенным недостатком автоматных сталей, как следствие повышенной концентрации серы, является снижение ударной вязкости, а также низкий порог хладноломкости. В этой связи представляется целесообразным для изготовления деталей кулачкового механизма использовать конструкционные стали по ГОСТ 4543–71 [3]: для кулачкового вала — сталь 15Х взамен АС14; для втулок подшипников скольжения — сталь 45Х взамен АС45Г2. Рекомендуется использовать термическое улучшение по указанным в ГОСТ 4543–71 режимам взамен нормализации.

Замена сталей и режима предварительной термической обработки обеспечит получение более высоких прочностных характеристик и регламентированных значений ударной вязкости (табл. 3), что обеспечит большую надежность и срок службы деталей механизма. После окончательной механической обработки для повышения износостойкости рабочих поверхностей целесообразно использовать вакуумное азотирование при рекомендованной для хромистых сталей температуре 540 °С в течение 4–8 часов [4–5].

Заключение. Установлены составы и возможные способы изготовления представленных для исследований деталей кулачкового механизма: вал изготовлен из стали марки DIN 1.0718 или AISI 12L14 после горячей пластической деформации или нормализации; втулка — из стали марки DIN 1.0762 после нормализации; на поверхности вала и втулки наблюдается тонкий сплошной слой избыточной нитридной фазы на основе железа.

Таблица 3

Характеристики анализируемых сталей

Сталь	Обработка	Предел прочности $\sigma_{\text{в}}$, МПа	Предел текучести $\sigma_{\text{т}}$, МПа	Относительное удлинение δ_5 , %	Ударная вязкость КСЧ, Дж/см ²	Твердость НВ
АС14	Горячекатанная	410	–	20	–	170
15Х	Закалка и высокий отпуск	690	490	12	69	179
АС45Г2	Горячекатанная нормализованная	640	440	6	–	255
45Х	Закалка и высокий отпуск	1030	835	9	59	360

В результате подбора аналогов используемым материалам и технологии обработки для изготовления аналогичных деталей кулачкового механизма предложено использовать стали после термического улучшения: 15Х для кулачкового вала и 45Х для подшипников скольжения. Для повышения износостойкости рабочих поверхностей деталей рекомендуется вакуумное азотирование при оптимальной для хромистых сталей температуре 540 °С в течение 4–8 часов.

Список источников

- [1] ГОСТ 1414–75. *Межгосударственный стандарт. Прокат из конструкционной стали высокой обрабатываемости резанием*. Москва, Стандартинформ, 1975.
- [2] Заславский А.Я. *Современные автоматные стали. Состав, включения, свойства*. Челябинск, Изд-во ЮУрГУ, 2005, 205 с.
- [3] ГОСТ 4543–71. *Межгосударственный стандарт. Прокат из легированной конструкционной стали*. Москва, Стандартинформ, 1971.
- [4] Смирнов А.Е., Фомина Л.П., Семенов М.Ю., Мохова А.С. Технологические возможности различных методов азотирования теплостойких сталей мартенситного класса. *МИТом*, 2021, № 8 (794), с. 36–43. <https://doi.org/10.30906/mitom.2021.8.36-43>
- [5] Поликевич К.Б., Петелин А.Л., Плохих А.И., Фомина Л.П. Диффузия азота по границам слоев при азотировании многослойных материалов. *Известия вузов. Черная металлургия*, 2024, № 67 (3), с. 308–324. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-3-318-324>