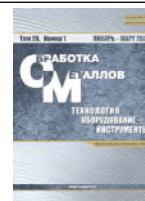




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Эластичные хоны для полирования профилей зубьев термообработанных цилиндрических колес специального назначения

Владимир Носенко ^{1, а, *}, Юрий Багайсков ^{1, b}, Алексей Мироседи ^{1, c}, Александр Горбунов ^{2, d}

¹ Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, ул. Энгельса 42а, г. Волжский, 404120, Россия

² Акционерное общество «Авиационные редукторы и трансмиссии – Пермские моторы», ул. Героев Хасана, 105г, г. Пермь, 614025, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0002-5074-1099>,  vladim.nosenko2014@yandex.ru; ^б  <https://orcid.org/0000-0002-2255-6064>,  bagaiskov@bk.ru;

^с  <https://orcid.org/0009-0001-8252-3299>,  mirosedy.ae@gmail.com; ^д  <https://orcid.org/0009-0001-5780-8508>,  gorbunov-as@reductor-pm.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК621.91

История статьи:

Поступила: 15 ноября 2023

Рецензирование: 07 декабря 2023

Принята к печати: 16 января 2024

Доступно онлайн: 15 марта 2024

Ключевые слова:

Хоны
Хонингование
Зубчатое колесо
Рецептура
Технология изготовления
Морфология
Химический состав

Финансирование

Исследование выполнено на основании договора № P0111Y2023 – 13/46-23 от 15.02.2023, заказчик АО «Авиационные редукторы и трансмиссии – Пермские моторы» (АО «Редуктор – ПМ»).

Благодарности

Авторы выражают благодарность к.т.н., доценту кафедры «Химическая технология полимеров и промышленная экология» ВПИ (филиал) ВолгГТУ А.Ф. Пучкову за поддержку и оценку работоспособности модельной пресс-формы.

АННОТАЦИЯ

Введение. Важнейшей составляющей технологического процесса изготовления зубчатых колес ответственных изделий является операция хонингования зубьев. Особые требования предъявляют к качеству поверхности зубчатых колес специального назначения, где применяли импортные абразивные инструменты, поставки которых в современных экономических условиях невозможны. **Цель работы:** разработка рецептуры, технологической оснастки и технологии изготовления эластичных алмазных зубчатых хонов взамен импортных для хонингования зубьев зубчатых колес специального назначения. **Методы исследования.** Предметом исследования являются образцы импортных эластичных хонов и создаваемые отечественные аналоги. Определяли механические свойства, морфологию и химический состав абразивного (алмазного) слоя рабочей поверхности зубьев и зубчатого венца. Содержание химических элементов контролировали в отдельных точках поверхности и сканированием по площади на растровом электронном микроскопе. Определяли рецептуру и технологию производства зубчатых хонов. **Результаты и обсуждение.** Разработаны конструкции пресс-форм для формообразования абразивного слоя и ступицы зубчатого хона. Выявлены особенности морфологии материала рабочего слоя и зубчатого венца эластичного алмазного хона. На основании проведенных исследований определены отечественные аналоги материалов составляющих элементов хона. Рассматривали две технологии изготовления: методом прессования и литья под давлением. Для отработки технологии изготовлены две пресс-формы: упрощенная модель, состоящая из двух зубьев, и круглая пресс-форма. Анализировали несколько способов изготовления зубьев хона: изготовление абразивного слоя с предварительной вулканизацией различной степени, последующим введением материала зубчатого венца и окончательной вулканизацией всего изделия. Определяли механические показатели материалов рабочего абразивного слоя и зубчатого венца. Исследовали химический состав составляющих хона и пограничной зоны. В результате проведенных исследований даны рекомендации по рецептуре абразивного слоя и зубчатого венца, а также по технологии изготовления зубчатого хона, предназначенного для окончательной обработки зубьев термообработанных цилиндрических колес специального назначения.

Для цитирования: Эластичные хоны для полирования профилей зубьев термообработанных цилиндрических колес специального назначения / В.А. Носенко, Ю.С. Багайсков, А.Е. Мироседи, А.С. Горбунов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 1. – С. 66–79. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.1-66-79.

*Адрес для переписки

Носенко Владимир Андреевич, д.т.н., профессор
 Волжский политехнический институт
 (филиал) Волгоградского государственного технического университета,
 ул. Энгельса, 42а,
 404120, г. Волжский, Россия
 Тел.: +7 904 403-31-74, e-mail: vladim.nosenko2014@yandex.ru

Введение

Зубохонингование – это операция окончательной обработки профилей зубьев термообработанных цилиндрических колес из легированных конструкционных сталей с твердостью HRC₃ 50–68 [1–3]. Зубчатый хон (абразивный шевр) представляет собой зубчатое колесо, рабочий венец которого изготовлен из композиционного материала на основе связки и абразивных материалов. Ступица хона обычно металлическая, из стали или алюминиевого сплава. Материал венца зубчатого хона состоит из связующего и режущих элементов – абразивных порошков определенной зернистости из различных абразивных материалов. Применение хонов способствует увеличению нагрузочной способности колес на 15–20 %, а долговечности – в 1,5–2,5 раза. Наибольшее распространение зубчатые хоны получили при обработке закаленных зубчатых колес 7–9-й степени точности.

Структурно-механические характеристики композиционного материала зубчатых хонов во многом определяют их работоспособность [4–6]. Величины этих показателей (прочность при разрыве и изгибе, ударная вязкость, модуль упругости, твердость) зависят от материала связки, технологических методов изготовления хонов, материала и зернистости шлифовальных порошков.

Абразивные зубчатые хоны изготавливают методом свободного литья или литья под давлением. В качестве связующих абразивно-полимерных композиций применяют эпоксидные смолы и акриловые пластмассы с различными пластификаторами и модификаторами. Кроме хонов на жестких связках с модулем упругости 3000–6000 МПа применяют эластичные хоны на полиуретановой, акрило-полиуретановой и гидроксипуриетановой связках, модуль упругости которых составляет 1100–1200 МПа. Повышенную упругость материалу хонов придает полиуретан СКУ-ПФЛ и другие сополимеры на уретановой основе [7, 8].

Исходя из требований к обработке зубчатых колес 7–9-й степени точности, хоны изготавливают из различных абразивных материалов – например, электрокорунда белого зернистостью F60–F90. Для обеспечения необходимой плотности и прочности материала хона дополнительно

вводят до 20 % шлифовальных порошков зернистостью F150–F180. Такой инструмент обеспечивает снижение погрешностей зубчатых колес прежде всего за счет перераспределения их величин – например, колебания измерительного межцентрового расстояния, погрешности профиля, повышения качества боковых поверхностей зубьев, снижения шума в зацеплении обработанных колес [3, 9].

Кроме зубчатых хонов, имеющих в качестве режущих элементов шлифовальные порошки из классических абразивных материалов, при зубохонинговании применяют алмазные зубчатые хоны. Алмазонаосный слой изготавливают на металлической и полимерных каучуковых связках [4, 10]. Безалмазная основа хонов может быть металлической (на основе цветных сплавов) и каучуковой (эластичные хоны). Для полирования зубчатых колес 5–6-й степени точности используют алмазные порошки с размером зерен основной фракции 28–20 мкм [11, 12].

Алмазные инструменты широко применяются в металлообработке при черновом [12], чистовом и прецизионном шлифовании [13–15]. Отдельные виды алмазного инструмента обеспечивают шероховатость на уровне операций полирования [16–19].

В производстве автомобилей, станков, авиационной и космической техники на операциях финишной обработки высокоточных зубчатых колес широкое распространение получили специальные алмазные и абразивные инструменты [20–22]. Например, для полирования поверхностей зубьев после шлифования используют импортные эластичные хоны [8]. Санкционная политика Запада существенно ограничила доступ российских производителей к импортному инструменту, отдельные позиции такого инструмента получить невозможно. В частности, это касается алмазных хонов для полирования зубчатых колес специального назначения.

Цель исследования: разработка рецептуры, технологической оснастки и технологии изготовления эластичных алмазных зубчатых хонов взамен импортных для хонингования зубьев зубчатых колес специального назначения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. На основании результатов обзора литературы, исследований механических свойств, мор-

фологии и химического состава анализируемого хона определить предполагаемые материалы абразивного слоя и зубчатого венца.

2. Разработать и изготовить оснастку для формирования лабораторных образцов зубчатого хона.

3. На основании результатов лабораторных исследований разработать рецептуру и технологию изготовления эластичных зубчатых хонов для хонингования зубьев зубчатых колес специального назначения.

Методика исследований

В качестве объектов исследования использовали образцы импортных хонов и создаваемых аналогов. Исследовали механические свойства, морфологию и химический состав алмазного и абразивного слоя рабочей поверхности зубчатого хона и зубчатого венца. Морфологию и химический состав исследовали на растровом двухлучевом электронном микроскопе Versa 3DFEI. Для исследования морфологии образцов использовали также оптический микроскоп «Альтами» СМ0870-Т с камерой высокого разрешения.

Каучуковые смеси изготавливали на валках модели Л16М. Диаметр валков 100 мм. Скорость вращения и зазоры между валками регулируемые.

Разрабатываемые композиции отечественных аналогов хонов на алмазной, абразивной и безабразивной основе формовали с последующей вулканизацией на прессе горячего прессования модели РНГ60-212/4. Образцы изготавливали в форме дисков диаметром 50 мм высотой 6–8 мм и пластин различных размеров той же высоты. Из пластин с помощью штампов на вырубной установке изготавливали образцы-«восьмерки» для испытаний на разрыв. Испытания выполняли на лабораторной установке модели РМИ-60. Образцы-диски предназначены для определения твердости по Шору на приборе модели LAC-J.

В качестве абразивного материала использовали шлифовальные порошки карбида кремния зеленого 64С и алмазные синтетические порошки марки АСМ зернистостью 28/20.

Результаты и их обсуждение

Импортный образец эластичного алмазного хона состоит из алмазоносного слоя (рабочая часть) и безалмазного зубчатого венца (далее –

зубчатый венец). Зубчатый венец крепится к ступице из дюралюминия. Фрагмент рабочей поверхности зубьев хона после правки алмазным инструментом и хонингования зубчатого колеса показан на рис. 1.

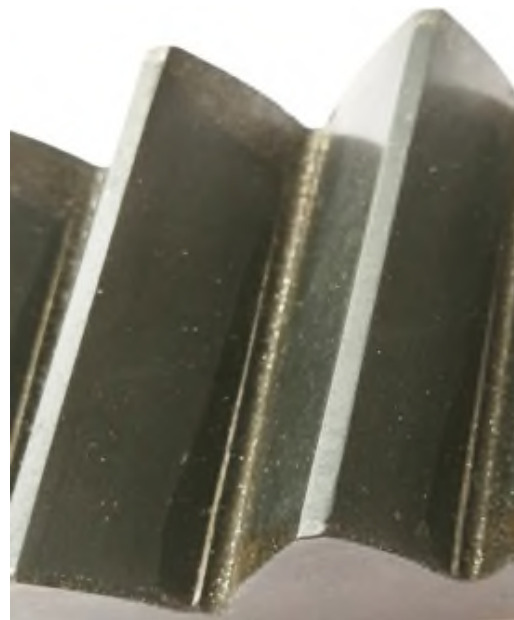


Рис. 1. Фрагмент рабочей поверхности зубьев хона

Fig. 1. Fragment of the working surface of the hone teeth

Твердость алмазоносного слоя на боковых поверхностях зубьев хона составляет 95–98 единиц по Шору. Твердость материала зубчатого венца – 85–90 единиц.

Морфологию и химический состав исследовали на фрагменте зуба рабочей части хона, из которого вырезали поперечные сечения толщиной 5 мм. По наружному контуру зуба (рис. 2, а) выделяется алмазоносный слой. Под ним находится материал зубчатого венца. В подавляющем большинстве исследованных сечений материалы имеют хорошо выраженную границу раздела. Об этом свидетельствует и состояние границы раздела, полученное при 50-кратном увеличении (рис. 2, б). В нижней части зуба исследуемого алмазного хона после его правки толщина левого алмазоносного слоя достигает 2,9 мм и снижается до 2,7–2,6 мм к вершине зуба (рис. 2, а). Толщина правого алмазоносного слоя на этой же высоте зуба – около 2,4 мм. Отличия в толщинах алмазоносного слоя по зубьям хона в среднем достигают 50 %.

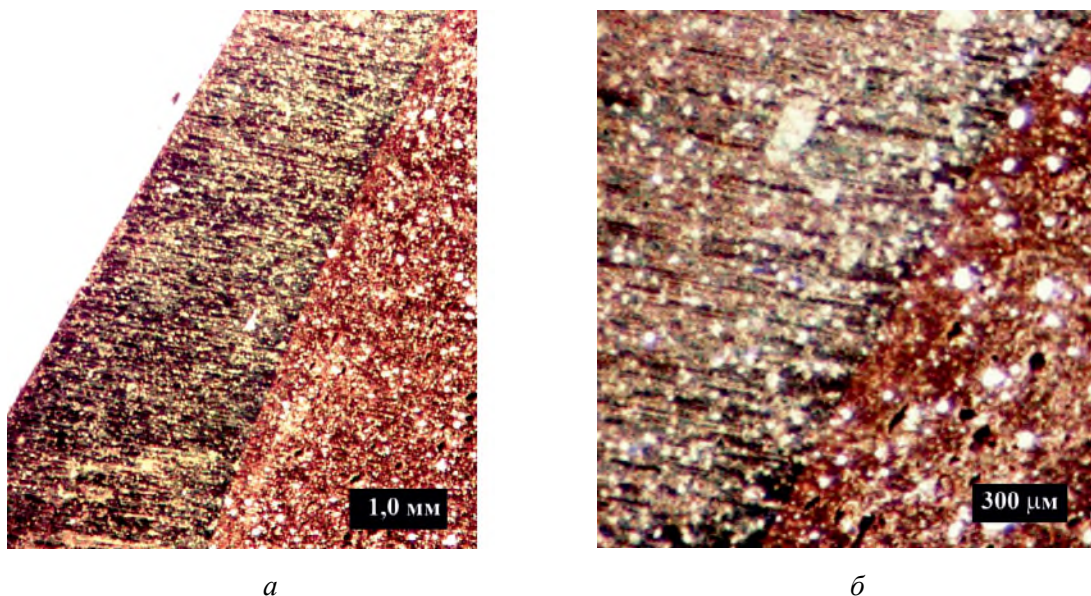


Рис. 2. Поперечное сечение зуба хона при увеличении 15× (а) и 50× (б)
 Fig. 2. Cross section of a hone tooth at magnification of 15× (a) and 50× (b)

На отдельных фотографиях в алмазоносном слое и в материале зубчатого венца обнаружены трещины (рис. 3, а); встречаются алмазоносные слои измененной структуры, сформированные на участке перехода от корня зуба к основной части хона (рис. 3, б, в). Можно предположить, что при температуре около 170 °С в результате перемещения более подвижного жидкого материала зубчатого венца происходит захват части алмазоносного слоя и перенос его в образовавшееся пространство на уровне ножки зуба. В этом случае толщина алмазоносного слоя может изменяться существенно.

В большей части анализируемых сечений зуба искажений алмазного слоя нет. Между материалом зубчатого венца и алмазоносным слоем у корня зуба сформирована достаточно четкая граница. Расслоения по границе раздела встречаются редко, в основном у корня зуба хона.

Морфологию и химический состав материала хона исследовали на растровом двухлучевом электронном микроскопе. На рис. 4, а приведена электронная фотография поперечного сечения зубчатого венца. На поверхности выделяются крупные белые пятна и более мелкие темные фрагменты, являющиеся пустотами (лунками).

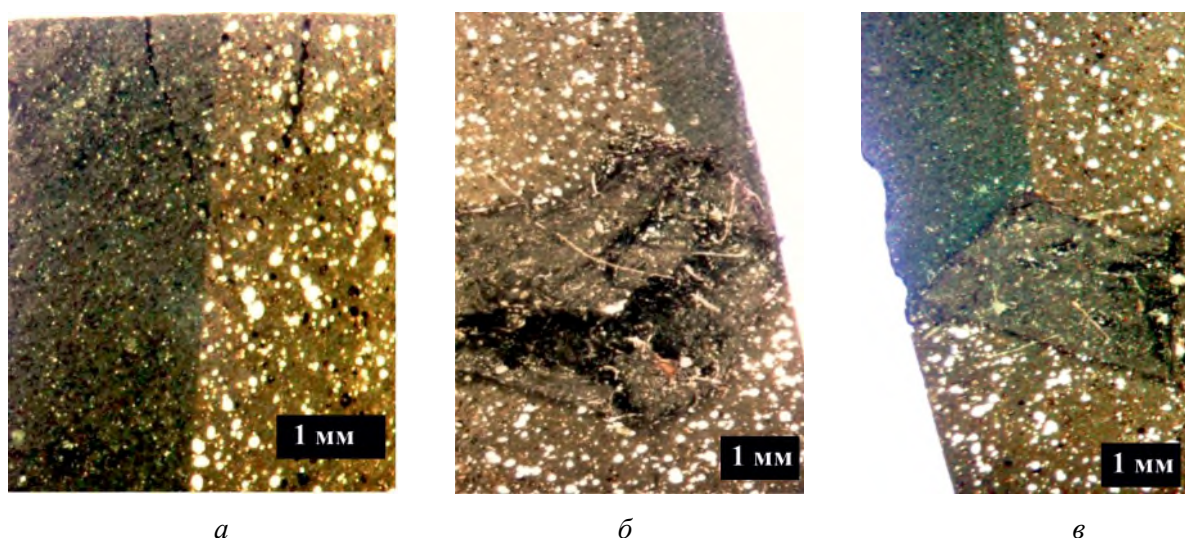


Рис. 3. Поперечное сечение зубьев хона с нарушениями целостности поверхности
 Fig. 3. Cross-section of hone teeth with surface integrity failures

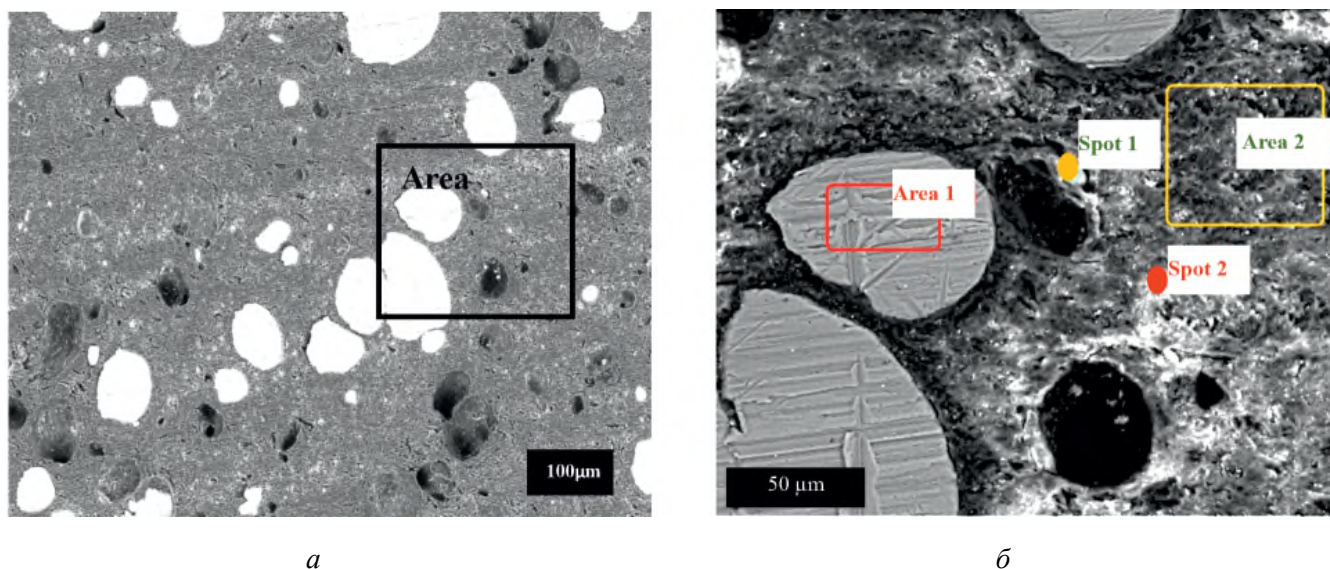


Рис. 4. Поперечное сечение зубчатого венца (а) и фрагмент области Area этого сечения (б)
 Fig. 4. Annular gear cross section (a) and a fragment of the “Area” of this cross section (b)

Лунки образовались в результате удаления порошка алюминия при отрезке исследуемой пластины от основного материала зубчатого хона. Химический состав исследовали в области Area, выделенной прямоугольником. Данная область представлена на рис. 4, б.

Химический состав зубчатого венца хона определяли методом сканирования по площади поверхности включений материала серого цвета (Area 1) и участка поверхности без видимых включений (Area 2). Точечный анализ проводили в области Spot 1 и Spot 2. Независимо от размера площади анализируемой поверхности диаметр электронного зонда составлял 50 нм.

При сканировании поверхности количество измерений (точек) в выделенных областях принято равным 400.

Основным химическим элементом на рентгенограммах в точках Spot 1, Spot 2 и поверхности Area 1 является Al. В качестве примера на рис. 5, а приведена рентгенограмма, полученная при сканировании поверхности Area 1. Аналогичные рентгенограммы получены в точках Spot 1 и Spot 2. Состав материала зубчатого венца определяли на поверхности Area 2 (рис. 4, б). Площадь поверхности выбранного участка – около 2600 мкм². Рентгенограмма поверхности показана рис. 5, б.

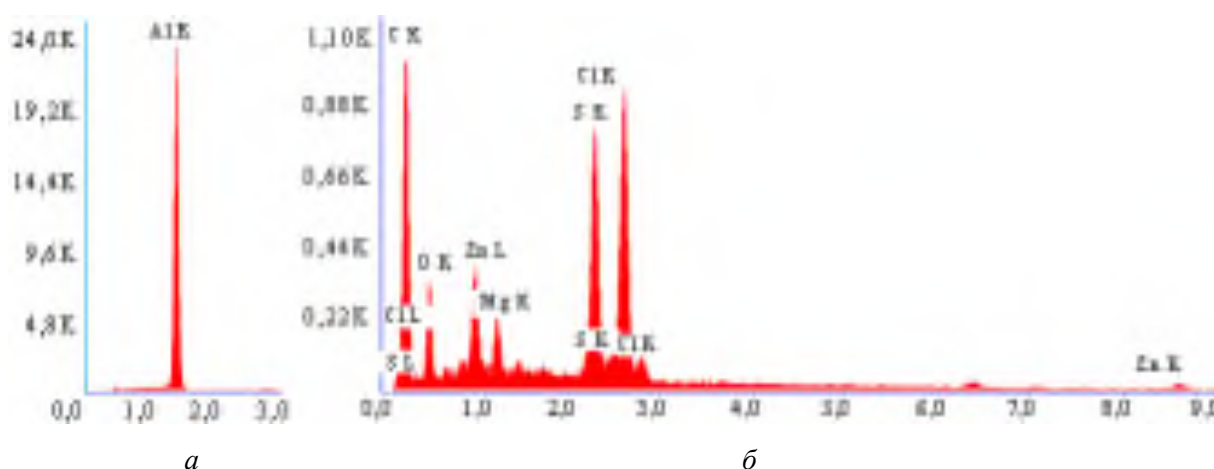


Рис. 5. Рентгенограммы объектов (см. рис. 4, б):
 а – Spot 1; б – Area 2

Fig. 5. X-ray radiographs of the objects in figure 4, б:
 а – Spot 1; б – Area 2

Основным химическим элементом анализируемых объектов является углерод – почти 57 % (см. таблицу). Далее следуют хлор (17 %), сера (12 %), кислород (8 %), цинк (5 %) и магний (около 1,6 %). По химическому составу данный материал в большей степени соответствует хлоропреновому каучуку. Близким по химическому составу является и бутадиен-нитрильный каучук.

Принципиальных различий между составами алмазоносного слоя и материала зубчатого венца не установлено. В составе алмазоносного слоя содержится в среднем на 1,5–2,0 % больше серы, что согласуется с его более высокой твердостью по сравнению с твердостью материала зубчатого венца.

Можно предположить, что основой алмазоносного слоя и зубчатого венца являются два близких по химическому составу материала, например, хлоропреновый и бутадиен-нитрильный каучуки, с добавлением различных наполнителей (связующие, мягчители, стабилизаторы, ускорители, вулканизаторы и др.). Для алмазоносного слоя и материала зубчатого венца данный каучук с наполнителями является связкой. В первом случае связка скрепляет и удерживает алмазные или абразивные зерна (порошки), во

втором – алюминиевый порошок (ГОСТ 6058–2022). Алюминиевый порошок в составе материала зубчатого венца выполняет контрольную функцию и определяет ресурс работы алмазного хона. Появление на темной рабочей поверхности зубьев хона светлых пятен включений алюминиевого порошка свидетельствует об износе алмазоносного слоя и необходимости смены абразивного инструмента.

Из предложенных материалов с использованием наполнителей на основании исследований твердости и прочности на разрыв определили оптимальный диапазон компонентов материала абразивного слоя и зубчатого венца. Твердость по Шору образцов с абразивом составляет 93–95 единиц, с алюминиевым порошком – 85–88 единиц, прочность на разрыв – 14 МПа и 11 МПа соответственно.

Для реализации различных технологических схем изготовления хона разработана и сделана специальная пресс-форма, состоящая из двух зубьев. Перед формованием абразивного слоя (рис. 6, а) с пресс-формы снимали верхнюю плиту 1. Пресс-форма будет иметь вид, показанный на рис. 6, б в центре. К пресс-форме винтами прикрепляли боковую плиту 2 (рис. 6, а). Подготовленные пластины материала абразивного

Химический состав объектов (см. рис. 4, б)
Chemical composition of the objects (see figure 4, b)

Объект / Object	Element	Weight, %	Atomic, %	Error, %
Spot 1	OK	3,1	5,1	9,4
	AlK	96,9	94,9	1,5
Spot 2	AlK	100,0	100,0	1,6
Area 1	AlK	100,0	100,0	1,6
Area 2	CK	56,8	75,8	10,6
	OK	8,4	8,4	12,7
	ZnL	5,2	1,3	8,5
	MgK	1,6	1,1	9,6
	SK	11,6	5,8	3,2
	ClK	16,7	7,6	3,2

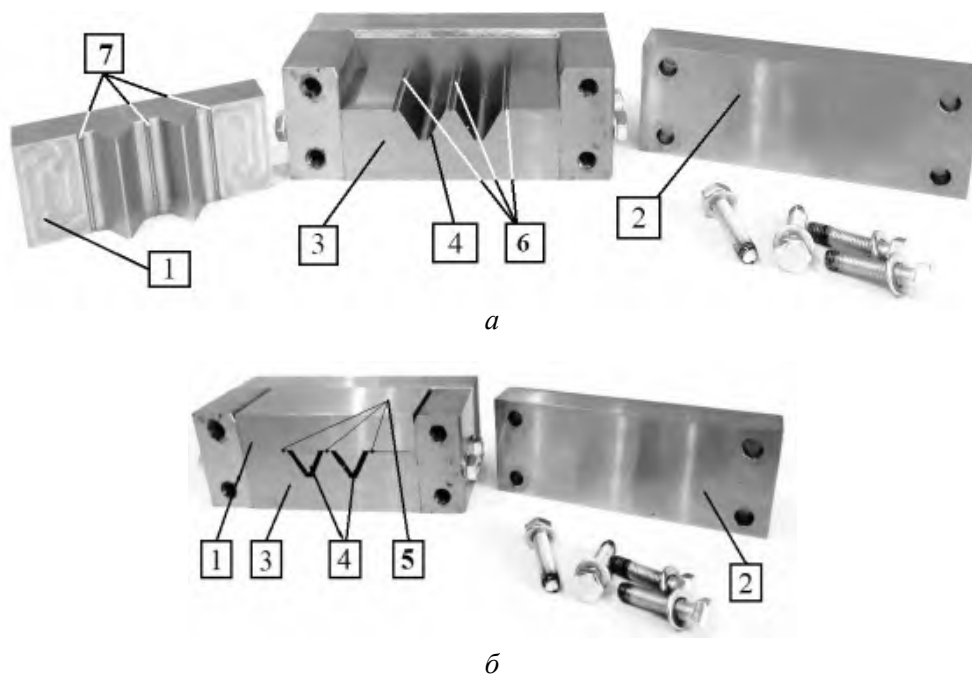


Рис. 6. Пресс-форма для формования алмазоносного слоя (а) и зубьев хона (б)
Fig. 6. A mold for forming a diamond-bearing layer (a) and hone teeth (b)

слоя, содержащего абразивный порошок, укладывали в пазы 4 нижней плиты 3 и распределяли равномерно на V-образной поверхности каждого зуба. Пластины прижимали верхней плитой 1 и устанавливали на стол пресса для формования абразивного слоя толщиной 3 мм, заданного конструктивными размерами пресс-формы. Избыток формируемого материала поступал в три отводных канала 5 (рис. 6, б). Каналы образованы в результате совмещения трех пазов 6 на нижней плите 3 (рис. 6, а) с тремя такими же пазами 7 на верхней плите 1.

Эта же пресс-форма с некоторыми доработками использовалась для изготовления двузубой модели хона (рис. 6, б). Подготовка к формованию заключается в удалении верхней формирующей плиты 1. Затем в пресс-форму на отформованный абразивный слой укладывали материал зубчатого венца и методом прессования получали двузубый фрагмент хона для исследования механических и физико-химических свойств материалов инструмента.

С целью исключения установленного факта смещения абразивного слоя при формовании (см. рис. 3) проведена предварительная вулканизация рабочего слоя. Затем, как было указано выше, в пресс-форму укладывали необходимое количество материала зубчатого венца и про-

изводили прессование с окончательной вулканизацией. Общий вид двузубого элемента хона показан на рис. 7, а. При попытке отрезать фрагмент зуба (торцовую часть) алмазным отрезным кругом абразивный слой отделился от материала зубчатого венца (рис. 7, б).

Для повышения прочности сцепления продолжительность частичной вулканизации была снижена в 1,5 и 2,0 раза. Прочность сцепления возросла, тем не менее с приложением усилия абразивный слой отделился. В связи с этим дальнейшие исследования проведены без предварительной вулканизации рабочего слоя. В левой части фотографии (рис. 8) виден рабочий слой, содержащий шлифовальный порошок из карбида кремния зеленого марки 63С зернистостью 28/20, в правой – материал зубчатого венца с добавлением алюминиевого порошка. Граница двухслойных образцов однородна, без нарушений целостности, что обеспечивает необходимую прочность их сцепления.

Спроектирована и изготовлена опытная пресс-форма для изготовления модели хона модулем 6 мм с количеством зубьев 14. Подобрана и изготовлена необходимая оснастка получения зубчатого хона методом горячего литья под давлением. Для предварительных исследований вместо алмазного порошка использовали карбид крем-

*a**b*

Рис. 7. Двухзубый фрагмент хона после вулканизации (а) и вид торцевой части зуба хона с предварительной вулканизацией абразивного слоя (б)

Fig. 7. Two-tooth fragment of a hone after vulcanization (a) and a view of the end part of a hone tooth with prevulcanized abrasive layer (b)

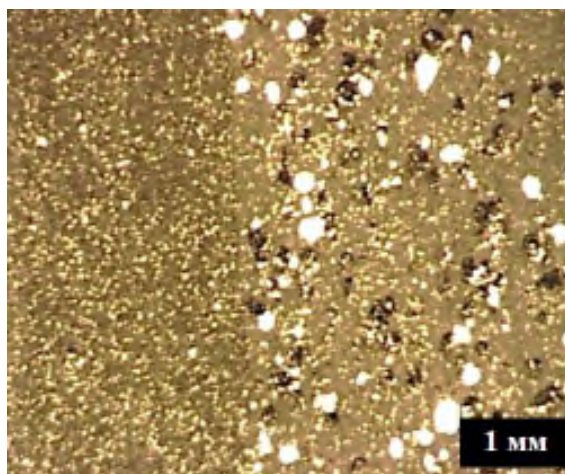


Рис. 8. Состояние границы раздела абразивного слоя и материала зубчатого венца

Fig. 8. Interface between the abrasive layer and the annular gear material

ния зеленый той же зернистости. В результате введения дополнительного количества вулканизирующих агентов получены следующие значения твердости по Шору: абразивный слой – 95 единиц, материал зубчатого венца – около 90 единиц. Модель хона успешно испытана при пробном хонинговании зубчатого колеса диаметром 114 мм и высотой 32 мм.

Хонингование зубчатых колес в производственных условиях осуществляют с использованием керосино-масляной СОТС. В связи с этим исследовано влияние данной СОТС на материал хона. Установлено, что после семи суток вы-

держки хона в керосино-масляной среде твердости рабочей поверхности абразивного слоя и материала зубчатого венца не изменились.

Для анализа состояния границы раздела абразивного слоя и материала зубчатого венца хон разрезали перпендикулярно оси. Морфологию поверхности поперечного сечения зуба хона исследовали на оптическом и электронном микроскопах. Граница раздела (рис. 9, *a*) обнаруживается визуально. Наблюдается уменьшение толщины абразивного слоя от вершины зуба хона к его ножке. Отдельно представлен фрагмент границы раздела абразивного слоя и материала зубчатого венца при 20-кратном увеличении (рис. 9, *б*). Цветовой фон позволяет провести условную границу между слоями. Основа материала в обоих составляющих одинакова, что обеспечивает прочную связь абразивного слоя с материалом зубчатого венца хона. В материал зубчатого венца для контроля износа абразивного слоя добавлен алюминиевый порошок.

Химический состав вблизи границы раздела исследовали на растровом электронном микроскопе. На рис. 10, *a* граница раздела абразивного слоя и материала зубчатого венца обозначена вертикальной линией 1. Химический состав обработанной поверхности определяли по горизонтальной линии 2, переходящей слева направо из области абразивного слоя в материал зубчатого венца. Основным химическим элементом материала хона является углерод, присутствующий

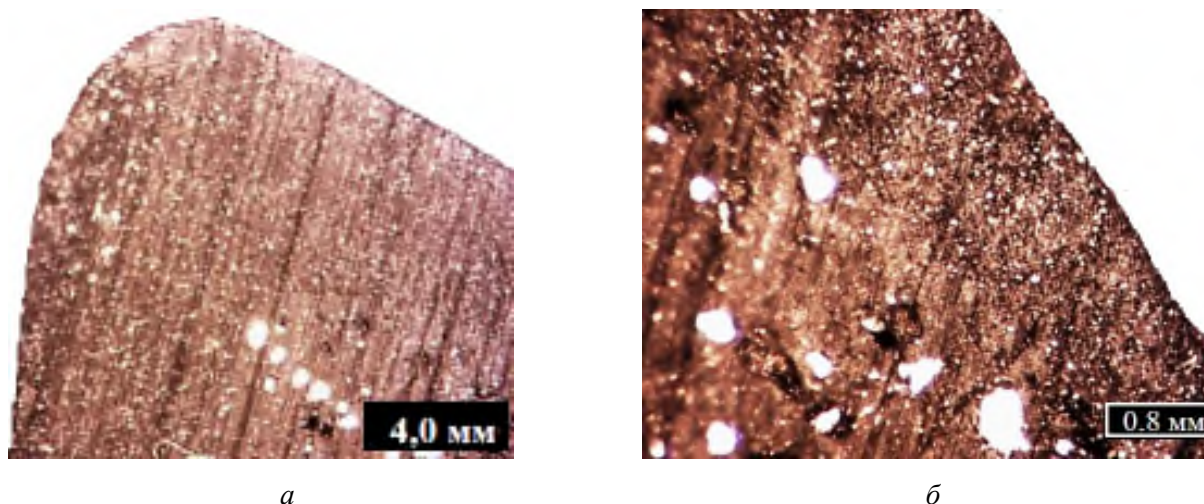


Рис. 9. Поперечные сечения зуба хона с использованием в качестве абразивного материала порошка из карбида кремния зеленого:

a – увеличение 5×; *б* – увеличение 20×

Fig. 9. Cross sections of a hone tooth using green silicon carbide powder as an abrasive material:

a – magnification 5×; *б* – magnification 20×

в составе абразивного слоя и зубчатого венца. В связи с этим регистрация углерода при анализе химического состава была отключена.

Химическими элементами, определенными рентгеноспектральным микроанализом, в данном случае являются кислород O, натрий Na, алюминий Al, кремний Si и сера S (рис. 10, б). Содержание O, Na и S в рассмотренных областях хона одинаково. В левой части, т. е. в абразивном слое, встречаются отдельные всплески концентрации кремния, что свидетельствует о наличии

кристаллов абразивного материала (карбида кремния). Поскольку трассу сканирования провели, исключая контакт с алюминиевым порошком, то алюминий в рассматриваемом сечении границы раздела не обнаружен.

Результаты рентгеноспектрального анализа согласуются с ранее полученными данными и свидетельствуют о равномерном распределении химических элементов в материале различных частей хона, кроме алюминия и кремния. Повышенное содержание алюминия обусловлено

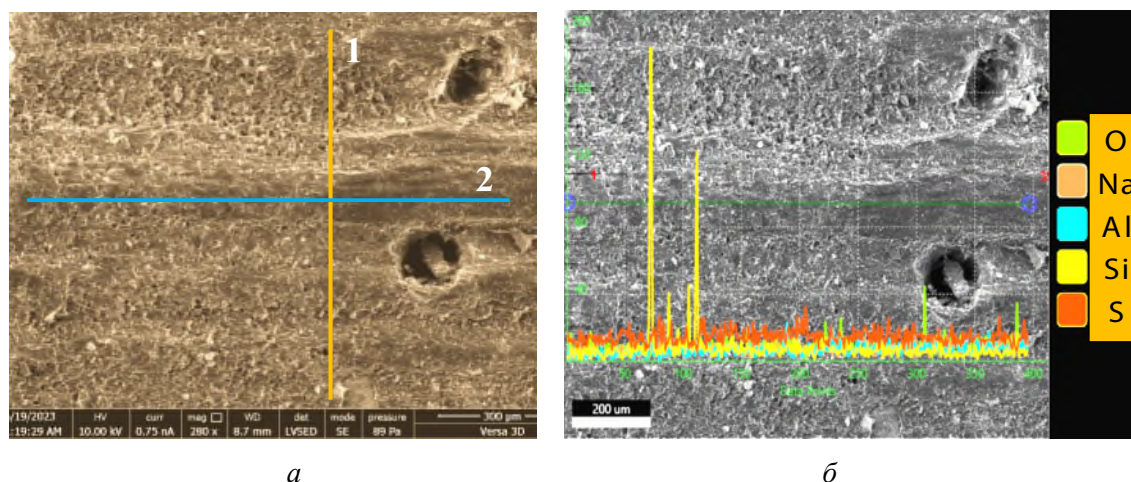


Рис. 10. Морфология (*a*) и химический состав (*б*) на границе раздела абразивного слоя с материалом зубчатого венца

Fig. 10. Morphology (*a*) and chemical composition (*б*) at the interface between the abrasive layer and the gear material



присутствием в материале зубчатого венца алюминиевого порошка, повышенное содержание кремния в материале абразивного слоя – наличием кристаллов карбида кремния.

Выводы

1. На основании обзора литературы и результатов исследования химического состава фрагментов импортного хона установлено, что в качестве материала хона можно использовать хлоропреновый и бутадиен-нитрильный каучуки, состав которых приближается к импортному аналогу.

2. Исследования механических свойств лабораторных образцов показали, что данные материалы с учетом добавок компонентов (увлажнителей, связующих, стабилизаторов, мягчителей, вулканизирующих агентов, ускорителей и др.) обеспечивают получение необходимой твердости по Шору абразивного слоя величиной 93–95 единиц, зубчатого венца хона – 85–88 единиц и прочность на разрыв 14 и 11 МПа соответственно.

3. Для отработки рецептуры и технологии производства отечественного аналога импортного хона изготовлена лабораторная пресс-форма из двух зубьев, позволяющая выполнять следующие операции: формование и термообработку абразивного слоя, совместное формование и термообработку абразивного слоя и зубчатого венца.

4. Установлено, что предварительная вулканизация абразивного слоя оказывает существенное влияние на силу его сцепления с материалом зубчатого венца: с увеличением степени вулканизации сила сцепления снижается. В связи с этим в технологическом процессе принята совместная вулканизация абразивного слоя и зубчатого венца.

5. Необходимую толщину абразивного слоя получали прокатыванием на валках с последующим профилированием в пресс-форме без вулканизации. Дальнейшая технология реализована методами литья под давлением и прессованием с последующей вулканизацией.

6. Спроектирована и изготовлена опытная пресс-форма для изготовления модели хона модулем 6 мм с числом зубьев 14. Модели хонов изготавливали методом литья под давлением.

Твердость по Шору абразивного слоя – 95 единиц, материала зубчатого венца – 90 единиц. Модель хона успешно испытана при пробном хонинговании зубчатого колеса.

7. После семи суток выдержки в керосино-масляной среде, используемой в производственных условиях на операции хонингования, твердости абразивного слоя зубчатого хона и материала зубчатого венца не изменились.

8. Разработанная рецептура эластичного зубчатого хона и технологии его изготовления приняты к апробации в производственных условиях.

Список литературы

1. Калашиников А.С. Зубохонингование зубчатых колес // РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. – 2013. – № 10 (88). – С. 22–29. – EDN SJMDXT.
2. Калашиников А.С., Моргунов Ю.А., Калашиников П.А. Особенности технологии зубохонингования цилиндрических колес // Справочник. Инженерный журнал. – 2014. – № 6 (207). – С. 3–9. – DOI: 10.14489/hb.2014.06.pp.003-009.
3. Чистовая обработка зубьев закаленных цилиндрических передач зубохонингованием / А.С. Калашиников, Ю.А. Моргунов, А.Н. Васильев, А.Г. Караванова // Справочник. Инженерный журнал. – 2022. – № 8. – С. 11–16. – DOI: 10.14489/hb.2022.08.pp.011-016.
4. Граф В. Шлифование и полирование зубчатых колес // РИТМ машиностроения. – 2016. – № 6. – С. 27–28.
5. Караванова А.Г., Калашиников А.С. Различия результатов процессов обработки зубчатых колес методами хонингования, шлифования и полирования исходя из выявленных значений микронеровностей обрабатываемой поверхности // Наука и бизнес: пути развития. – 2020. – № 11 (113). – С. 23–27.
6. Bagaiskov Yu., Ushakov N. Physical and mechanical parameters of gear hones with modified epoxy-polymer bond // Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). – Springer, 2022. – Vol. 2. – P. 533–540. – DOI: 10.1007/978-3-030-85230-6_63.
7. Анализ механических свойств полиуретановых материалов, изготовленных по растворной и литьевой технологии / В.Д. Кислицын, В.В. Шадрин, И.В. Осоргина, А.Л. Свистков // Вестник Пермского университета. Физика. – 2020. – Вып. 1. – С. 17–25. – DOI: 10.17072/1994-3598-2020-1-17-25.
8. Шумилов Ф.П. Композиты на основе литьевых полиуретанов, модифицированных частицами нанок углеродов: дис. ... канд. хим. наук. – СПб., 2021. – 186 с.

9. *Bagaiskov Yu.* Influence of elastic deformation of gear hone teeth on machined gear accuracy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 971. – P. 042014. – DOI: 10.1088/1757-899X/971/4/042014.
10. *Севастьяненко Г.Н., Рабинович Э.С., Яковчук Ю.А.* Алмазные зубчатые хоны на каучуковых связках // Синтетические алмазы. – 1978. – № 3. – С. 27–28.
11. *Graf W.* Polish grinding of gears for higher transmission efficiency // Gear solutions: website. – 2016, May 27. – URL: <http://gearsolutions.com/features/polish-grinding-of-gears-for-higher-transmission> (accessed: 07.02.2024).
12. Creep feed grinding of γ -TiAl using single layer electroplated diamond superabrasive wheels / R. Hood, P. Cooper, D.K. Aspinwall, S.L. Soo, D.S. Lee // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2015. – Vol. 11. – P. 36–44. – DOI: 10.1016/j.cirpj.2015.07.001.
13. Evaluation of workpiece surface integrity following point grinding of advanced titanium and nickel based alloys / D. Curtis, S.L. Soo, D.K. Aspinwall, A. Mantle // Procedia CIRP. – 2016. – Vol. 45. – P. 47–50. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.343.
14. *Mohan R., Deivanathan R.* A review of self-sharpening mechanisms of fixed abrasive tools // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. – 2019. – Vol. 10 (2). – P. 965–974.
15. *Anderson D., Warkentin A., Bauer R.* Comparison of spherical and truncated cone geometries for single abrasive-grain Cutting // Journal of Materials Processing Technology. – 2012. – Vol. 212 (9). – P. 1946–1953. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.04.021.
16. A systematic investigation on the diamond wear mechanism during the dry scratching of WC/Co / Q. Zhang, Q. Zhao, H. Su, S. To // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2017. – Vol. 70. – P. 184–190. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2017.10.006.
17. A novel agglomerated diamond abrasive with excellent micro-cutting and self-sharpening capabilities in fixed abrasive lapping processes / J. Chen, T. Sun, J. Su, J. Li, P. Zhou, Y. Peng, Y. Zhu // Wear. – 2020. – Vol. 464–465. – P. 203531. – DOI: 10.1016/j.wear.2020.203531.
18. Relation between self-organization and wear mechanisms of diamond films / V. Podgursky, A. Bogatov, M. Yashin, S. Sobolev, I. Gershman // Entropy. – 2018. – Vol. 20 (4). – P. 279. – DOI: 10.3390/e20040279.
19. *Butler-Smith P., Axinte D.A., Daine M.* Solid diamond micro-grinding tools: from innovative design and fabrication to preliminary performance evaluation in Ti–6Al–4V // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2012. – Vol. 59. – P. 55–64. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.03.003.
20. Патент № 2358852 Российская Федерация. Состав алмазного инструмента / Альтшулер В.М., Герасимов С.А., Духовской А.И., Подобранный А.В. – № 2007104185/02; заявл. 05.02.2007; опубл. 20.06.2009, Бюл. № 17.
21. Патент № 2489248 Российская Федерация. Состав алмазного инструмента / Герасимов С.А. – № 20011149103/02; заявл. 02.12.2011; опубл. 10.08.2013, Бюл. № 22.
22. Патент № 2513429 Российская Федерация. Состав полировального инструмента со связанным абразивом / Герасимов С.А., Дмитриева Н.М., Косарева Т.А., Каспарова Е.Г. – № 20011149105/05; заявл. 02.12.2011; опубл. 20.04.2014, Бюл. № 11.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Elastic hones for polishing tooth profiles of heat-treated spur wheels for special applications

Vladimir Nosenko^{1, a, *}, Yuri Bagaikov^{1, b}, Alexei Mirocedi^{1, c}, Alexander Gorbunov^{2, d}

¹ Volzhsky Polytechnic Institute (branch) of Volgograd State Technical University, 43a Engelsa str., Volzhskiy, 404120, Russian Federation

² Joint Stock Company "Aviation Gearboxes and Transmissions - Perm Motors", 105g Geroev Khasan St., Perm, 614025, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0002-5074-1099>,  vladim.nosenko2014@yandex.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-2255-6064>,  bagaikov@bk.ru;

^c  <https://orcid.org/0009-0001-8252-3299>,  mirosedy.ae@gmail.com; ^d  <https://orcid.org/0009-0001-5780-8508>,  gorbunov-as@reductor-pm.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 15 November 2023

Revised: 07 December 2023

Accepted: 16 January 2024

Available online: 15 March 2024

Keywords:

Hone

Honing

Gearing

Recipe

Manufacturing technology

Morphology

Chemical composition

Funding:

The research was performed under the contract No. Z0111U2023 - 13/46-23 dated 15.02.2023, customer JSC "Aviation Gearboxes and Transmissions - Perm Motors" (JSC "Reductor - PM")

Acknowledgements

The authors express their gratitude to A.F. Puchkov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Chemical Technology of Polymers and Industrial Ecology", VPI (branch) of VolGTU, for support and evaluation of the performance of the model mold.

ABSTRACT

Introduction. The most important component of the technological process of manufacturing of gear wheels of critical products is the operation of teeth honing. Special requirements are imposed on the surface quality of special-purpose gears, where imported abrasive tools were used, the supply of which in modern economic conditions is impossible. **Purpose of work:** development of formulation, technological equipment and technology of manufacturing of elastic diamond gear hones instead of imported ones for teeth honing of gear wheels of special purpose. **Research methods.** Subject of research are samples of imported elastic gear hones and created domestic analogs. The mechanical properties, morphology and chemical composition of the abrasive (diamond) layer of the working surface of the teeth and the annular gear were determined. The content of chemical elements was controlled in separate points of the surface and by scanning over the area on a scanning electron microscope. The formulation and technology of production of annular gears were determined. **Results and Discussion.** Designs of molds for forming the abrasive layer and the hub of the gear hone are developed. The peculiarities of morphology of the material of the working layer and the annular gear of the elastic diamond gear hone are revealed. On the basis of the conducted research, domestic analogs of materials of constituent elements of the gear hone are determined. Two manufacturing technologies were considered: pressing and injection molding. Two molds were made to test the technology: a simplified model consisting of two teeth and a round mold. Several methods of manufacturing hone teeth were analyzed: manufacturing of an abrasive layer with different degree of pre-vulcanization, subsequent introduction of gear material and final vulcanization of the whole product. The mechanical properties of the materials of the working abrasive layer and the annular gear were determined. The chemical composition of the components of the hone and the boundary zone are studied. As a result of the conducted research, recommendations on the formulation of the abrasive layer and the annular gear, technology of manufacturing of the gear hone intended for final treatment of teeth of heat-treated spur wheels of special purpose are given.

For citation: Nosenko V.A., Bagaikov Y.S., Mirocedi A.E., Gorbunov A.S. Elastic hones for polishing tooth profiles of heat-treated spur wheels for special applications. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 1, pp. 66–79. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.1-66-79. (In Russian).

* Corresponding author

Nosenko Vladimir A. D.Sc. (Engineering), Professor

Volzhsky Polytechnic Institute

(branch) of Volgograd State Technical University,

43a Engelsa str.,

404120, Volzhskiy, Russian Federation

Tel.: +7 904 403-31-74, e-mail: vladim.nosenko2014@yandex.ru

References

1. Kalashnikov A.S. Zubokhoningovanie zubchatykh koles [Technology of a gear-tooth honing of cylindrical gears]. *RITM: Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiya*, 2013, no. 10 (88), pp. 22–29. (In Russian).
2. Kalashnikov A.S., Morgunov J.A., Kalashnikov P.A. Osobennosti tekhnologii zubokhoningovaniya tsilindricheskikh koles [Technology features of honing of cylindrical gears]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal = Handbook. An Engineering journal*, 2014, no. 6 (207), pp. 3–9. DOI: 10.14489/hb.2014.06.pp.003-009.
3. Kalashnikov A.S., Morgunov Yu.A., Vasilyev A.N., Karavanova A.G. Chistovaya obrabotka zub'ev zakalennykh tsilindricheskikh peredach zubokhoningovaniem [Finishing treatment of the teeth of hardened cylindrical gears by tooth honing]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal = Handbook. An Engineering journal*, 2022, no. 8, pp. 11–16. DOI: 10.14489/hb.2022.08.pp.011-016.
4. Graf W. Shlifovanie i polirovanie zubchatykh koles [Grinding and polishing of gears]. *RITM mashinostroeniya = Rhythm of machinery*, 2016, no. 6, pp. 27–28. (In Russian).
5. Karavanova A.G., Kalashnikov A.S. Razlichie rezul'tatov protsessov obrabotki zubchatykh koles metodami khoningovaniya, shlifovaniya i polirovaniya iskhodya iz vyyavlennykh znachenii mikronerovnostei obrabatyvaemoi poverkhnosti [The difference in processing of gear wheels by honing, grinding and polishing methods based on the identified values of surface microroughness]. *Nauka i biznes: puti razvitiya = Science and Business: Development Ways*, 2020, no. 11 (113), pp. 23–27.
6. Bagaiskov Yu., Ushakov N.A. Physical and mechanical parameters of gear hones with modified epoxy-polymer bond. *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021)*. Springer, 2022, vol. 2, pp. 533–540. DOI: 10.1007/978-3-030-85230-6_63.
7. Kislytsyn V.D., Shadrin V.V., Osorgina I.V., Svistkov A.L. Analiz mekhanicheskikh svoystv poliuretanovykh materialov, izgotovlennykh po rastvornoi i lit'evoi tekhnologii [Analysis of the mechanical properties of polyurethane materials manufactured by mortar and injection technology]. *Vestnik Permskogo universiteta. Fizika = Bulletin of Perm University. Physics* 2020, iss. 1, pp. 17–25. DOI: 10.17072/1994-3598-2020-1-17-25.
8. Shumilov F.P. *Kompozity na osnove lit'evykh poliuretanov, modifitsirovannykh chastitsami nanouglerodov*. Diss. kand. khim. nauk [Composites based on cast polyurethanes modified with nanocarbon. PhD chemical sci. diss.]. St. Petersburg, 2021. 186 p.
9. Bagaiskov Yu. Influence of elastic deformation of gear hone teeth on machined gear accuracy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 971, p. 042014. DOI: 10.1088/1757-899X/971/4/042014.
10. Sevast'yanenko G.N., Rabinovich E.S., Yakovchuk Yu.A. Almaznye zubchatye khony na kauchukovykh svyazkakh [Diamond tooth hones on rubber bonds]. *Sinteticheskie almazy*, 1978, no. 3, pp. 27–28. (In Russian).
11. Graf W. Polish grinding of gears for higher transmission efficiency. *Gear solutions*: website, 2016, May 27. Available at: <http://gearsolutions.com/features/polish-grinding-of-gears-for-higher-transmission> (accessed 07.02.2024).
12. Hood R., Cooper P., Aspinwall D.K., Soo S.L., Lee D.S. Creep feed grinding of γ -TiAl using single layer electroplated diamond superabrasive wheels. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2015, vol. 11, pp. 36–44. DOI: 10.1016/j.cirpj.2015.07.001.
13. Curtis D., Soo S.L., Aspinwall D.K., Mantle A. Evaluation of workpiece surface integrity following point grinding of advanced titanium and nickel based alloys. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 45, pp. 47–50. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.343.
14. Mohan R., Deivanathan R. A review of self-sharpening mechanisms of fixed abrasive tools. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2019, vol. 10 (2), pp. 965–974.
15. Anderson D., Warkentin A., Bauer R. Comparison of spherical and truncated cone geometries for single abrasive-grain cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, vol. 212 (9), pp. 1946–1953. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.04.021.
16. Zhang Q., Zhao Q., Su H., To S. A systematic investigation on the diamond wear mechanism during the dry scratching of WC/Co. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2017, vol. 70, pp. 184–190. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2017.10.006.
17. Chen J., Sun T., Su J., Li J., Zhou P., Peng Y., Zhu Y. Novel agglomerated diamond abrasive with excellent micro-cutting and self-sharpening capabilities in fixed abrasive lapping processes. *Wear*, 2020, vol. 464–465, p. 203531. DOI: 10.1016/j.wear.2020.203531.
18. Podgursky V., Bogatov A., Yashin M., Sobolev S., Gershman I. Relation between self-organization and wear mechanisms of diamond films. *Entropy*, 2018, vol. 20 (4), p. 279. DOI: 10.3390/e20040279.

19. Butler-Smith P., Axinte D.A., Daine M. Solid diamond micro-grinding tools: from innovative design and fabrication to preliminary performance evaluation in Ti–6Al–4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, vol. 59, pp. 55–64. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.03.003.

20. Al'tshuller V.M., Gerasimov S.A., Dukhovskoj A.I., Podobryanskij A.V. *Sostav almaznogo instrumenta* [Diamond tool composition]. Patent RF, no. 2358852, 2009.

21. Gerasimov S.A. *Sostav almaznogo instrumenta* [Diamond tool composition]. Patent RF, no. 2489248, 2013.

22. Gerasimov S.A., Dmitrieva N.M., Kosareva T.A., Kasparova E.G. *Sostav poliroval'nogo instrumenta so svyazannym abrazivom* [Composition of polishing instrument with bound abrasive]. Patent RF, no. 2513429, 2014.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2024 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).