

ОБРАБОТКА АБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ ВЫСОКОВЯЗКОЙ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ ОБРАЗЦОВ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ АУСТЕНИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ

© 2023

- В. А. Левко** доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии машиностроения; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск; levkosaa@mail.ru
- Н. С. Теряев** доцент кафедры технологии машиностроения; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск; nikolay-teryaev@mail.ru
- О. В. Литовка** аспирант; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск; litovka.9518@gmail.com
- П. А. Иванов** аспирант; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск; Ivanov.pasch.iva@yandex.ru

Представлены результаты исследований обработки абразивным потоком съёмных образцов литых заготовок из аустенитно-мартенситной стали, размещённых в имитаторе закрытого криволинейного канала. Оценивалось изменение шероховатости и микротвёрдости поверхности образцов. Выделено два этапа обработки. На первом этапе обработки удаляется большая часть литейной корки. На втором этапе литейная корка удаляется полностью и происходит снятие слоя основного металла. Установлено, что основным механизмом снятия материала с поверхности литой заготовки является микрорезание на уровне элементарных фактических площадей касания отдельных микровыступов зерна. По результатам экспериментов рекомендовано применять обработку абразивным потоком высоковязкой средой для улучшения шероховатости и повышения микротвёрдости внутренних поверхностей закрытых каналов литых заготовок.

Обработка абразивным потоком; аустенитно-мартенситная сталь; литая заготовка; высоковязкая рабочая среда

Цитирование: Левко В.А., Теряев Н.С., Литовка О.В., Иванов П.А. Обработка абразивным потоком высоковязкой рабочей среды образцов литых заготовок из аустенитно-мартенситной стали // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22, № 3. С. 122-132. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-3-122-132

Введение

Известно, что для изготовления ряда деталей турбонасосного агрегата используют литейные коррозионно-стойкие стали 03X11H8M2ФЛ, 03X12H10MTЮЛ, 04X12H6M5KЮЛ, 08X14H7МЛ. При этом состояние поверхностного слоя деталей после формообразования методом литья по выплавляемым моделям характеризуется: повышенной шероховатостью ($Ra = 6,2 \dots 12,5$ мкм); большой глубиной термически изменённого слоя (литейная корка $h = 0,1 \dots 0,8$ мм); высокими остаточными напряжениями [1]. При обработке заготовок из аустенитно-мартенситных сталей в отожжённом состоянии получить поверхности высокого класса шероховатости затруднительно [2]. Сталь 08X14H7МЛ плавят в открытых или вакуумных индукционных печах. Отливки отве-

чают требованиям по прочностным и пластическим характеристикам, однако в них обнаружены такие макродефекты, как зональные рыхлоты площадью 10...14 мм² [3].

Литые детали из аустенитно-мартенситных сталей имеют сложные каналы, расположенные, в основном, по окружности (лопатки крыльчаток, турбин, роторов, направляющих аппаратов и др.); поверхности каналов находятся под углом (до 350°) относительно направления потока газа и жидкости в агрегатах с изменением углов наклона каналов по его длине, а геометрические параметры каналов изменяются в широком диапазоне [1]. Окончательная обработка закрытых каналов подобных деталей традиционными методами затруднена.

Сравнительный анализ современного уровня финишных технологий обработки закрытых каналов деталей показал, что в мировой практике более широкое применение находит метод обработки абразивным потоком (*abrasive flow machining (AFM)*). В ряде работ эта технология имеет такие названия как абразивно-экструзионная обработка или экструзионное хонингование. В этом способе высоковязкий полимерный (силиконовый) материал, равномерно наполненный мелкодисперсными абразивными частицами, возвратно-поступательно перемещается поршнями рабочих цилиндров через обрабатываемую деталь. Этот материал (среда) под давлением становится текучей (вязкоупругой) матрицей. При течении создаётся сжимающее давление на обрабатываемую поверхность и осуществляется абразивный контакт [4].

Начиная с 80-х годов прошлого века метод *AFM* стал применяться для удаления дефектного слоя в отверстиях охлаждения лопаток и дисков, обработанных лазером или электроэрозионной обработкой; снятия заусенцев в отверстиях форсунок для распыления топлива и полирования литых поверхностей лопаток, колёс компрессора и рабочих колёс [5].

К настоящему времени известен целый ряд работ, посвящённый обработке абразивным потоком поверхностей различных литых деталей. Экструзионное хонингование каналов деталей повышает качество обработанной поверхности и обеспечивает точность расхода компонентов топлива через эти каналы. Однако при этом наблюдается незначительная неравномерность обработки [6]. Применение методики обеспечения качества каналов деталей летательных аппаратов с использованием абразивно-экструзионной обработки позволило обеспечить заданную точность расхода компонентов топлива через каналы деталей, имеющих большое количество лопаток, а также достичь требуемой шероховатости их поверхностей в диапазоне $Ra = 1,6...3,2$ мкм [7]. Исследования процесса полирования абразивным потоком неподвижного лопаточного венца (кольца) из легированной стали на основе методологии поверхности отклика показали, что шероховатость этой поверхности существенно улучшилась до $Ra = 0,33$ мкм [8].

Проведённый анализ контактных взаимодействий при *AFM* средой высокой вязкости выявил основные особенности процесса: самозатачивание абразивных зёрен за счёт скалывания их граней; периодическая смена активных абразивных зёрен в процессе многократной экструзии рабочей среды; разные виды контактных взаимодействий на контурной и фактической площади контакта абразивного зерна и обрабатываемой поверхности [9]. Анализ зарубежных [10] и российских публикаций [11] прошлых исследований и достижений в процессе отделки абразивным потоком не выявил значимых результатов по описанию состояния поверхностного слоя литых деталей из аустенитно-мартенситных сталей до и после обработки. Оценивались, как правило, лишь величина и направление шероховатости поверхности до и после обработки [6 – 8; 12].

Основной целью данного исследования является уточнение режимов обработки и составов рабочих сред для *AFM* закрытых каналов заготовок из литейной аустенитно-мартенситной стали на основе анализа контактных взаимодействий.

Экспериментальные исследования процесса обработки абразивным потоком литых образцов из стали 08X14H7МЛ

Для проведения экспериментальной обработки абразивным потоком было создано приспособление, имитирующее внутренний канал литой заготовки (рис. 1). Корпус приспособления *1* имеет сквозной внутренний канал, а также паз для размещения съёмной части приспособления. На торцах корпуса *1* есть две сопрягаемых поверхности, которые устанавливаются в рабочие цилиндры установки для обработки абразивным потоком. Съёмная часть состоит из плиты *2*, основания *3* с выполненным в нём криволинейным каналом *6*. В пазы канала размещаются съёмные литые образцы *4* и *5*. Сверху канал *6* с образцами *4* и *5* закрывается крышкой (на рис. 1 не показана) при помощи винтов. В крышке выполнены пазы под верхнюю часть образцов.

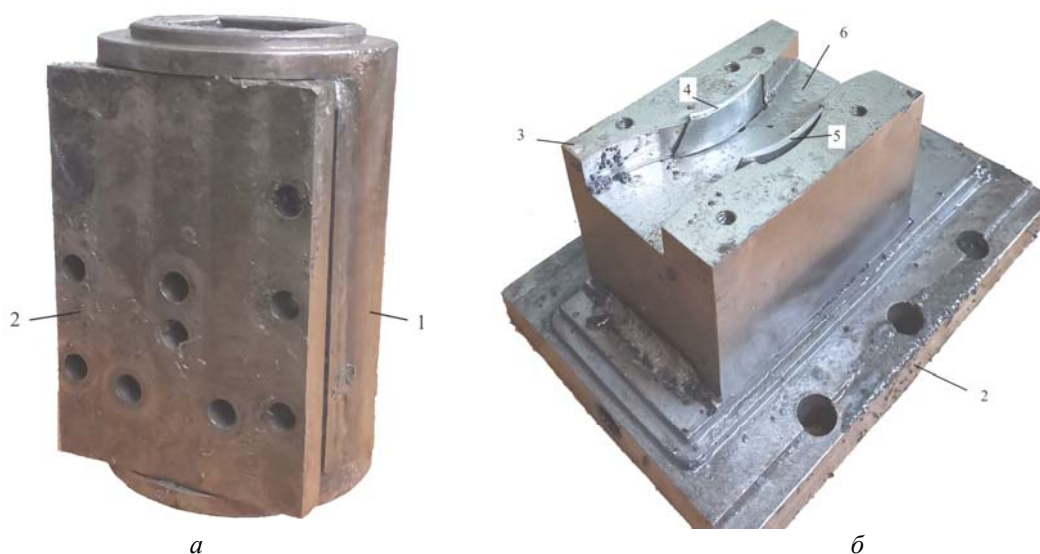


Рис. 1. Приспособление – имитатор внутреннего канала литой заготовки:
а – общий вид; *б* – съёмная часть

При установке собранной съёмной части приспособления в корпус *1* криволинейный канал *6* совместно с внутренним каналом корпуса образует полость для течения рабочей среды (имитирует закрытый канал). В свою очередь, съёмные литые образцы имитируют перо лопатки и показаны на рис. 2.

Состав рабочей среды и режимы *AFM* выбраны по рекомендациям предыдущего исследования: каучук синтетический диметилсилоксановый термостойкий СКТ (ГОСТ 14680-74, ТУ 38.103694-89) – 50%; электрокорунд белый 25А зернистостью *F70* – 50%; давление в системе – 12 МПа [12].

В качестве оцениваемых факторов были приняты такие показатели поверхности образцов до, во время обработки (после 30 циклов) и после *AFM* (60 циклов обработки), как величина и направление шероховатости; микротвёрдость (остаточные напряжения).

Состояние поверхности вогнутого и выпуклого съёмного литого образца до обработки, после 30 циклов *AFM* и после 60 циклов *AFM* оценивались по изображениям, полученным на оптическом микроскопе (рис. 3 – 5). Профилограммы (рис. 6) и величина шероховатости образцов определялись на профилометре модели *MarSurf M300*. Фактическая микротвёрдость образцов измерена на приборе *BUEHLER MICROMET 5100*. Численные показатели изменения шероховатости и микротвёрдости поверхности образцов от количества циклов обработки приведены в табл. 1.

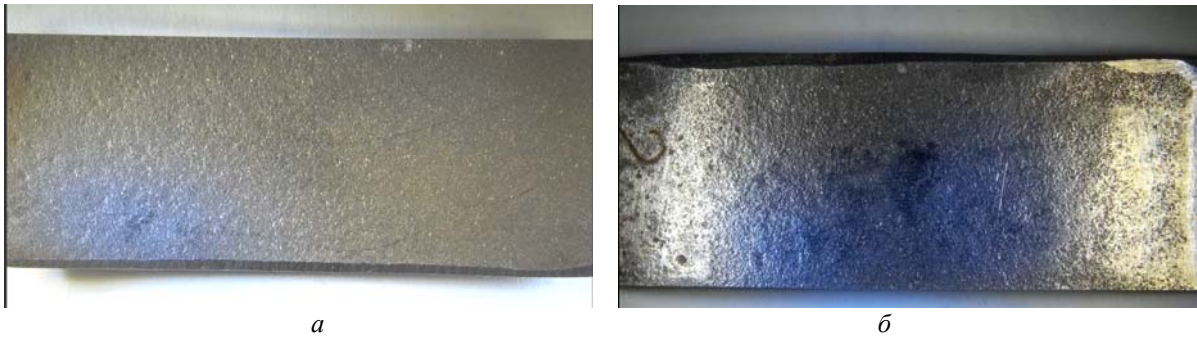


Рис. 2. Съёмный литой образец – имитатор пера лопатки из стали 08X14H7МЛ:
а – вогнутая часть; б – выгнутая часть

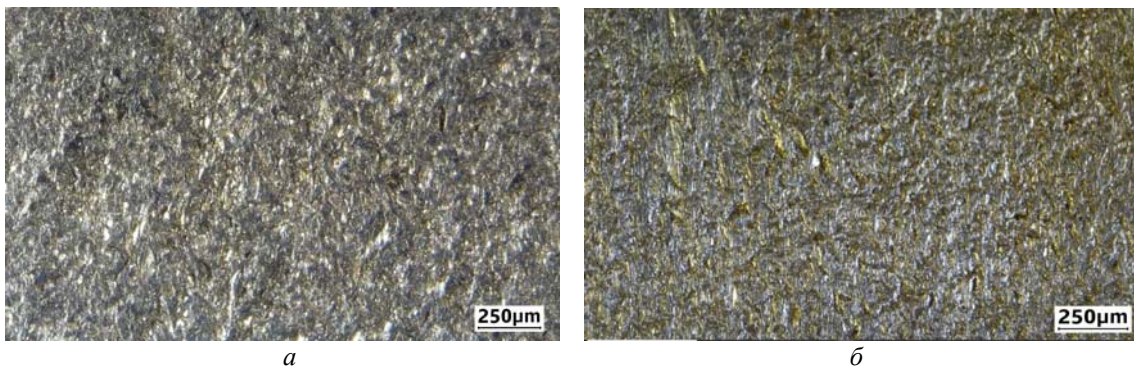


Рис. 3. Поверхность съёмного литого образца до обработки: а – вогнутый; б – выгнутый

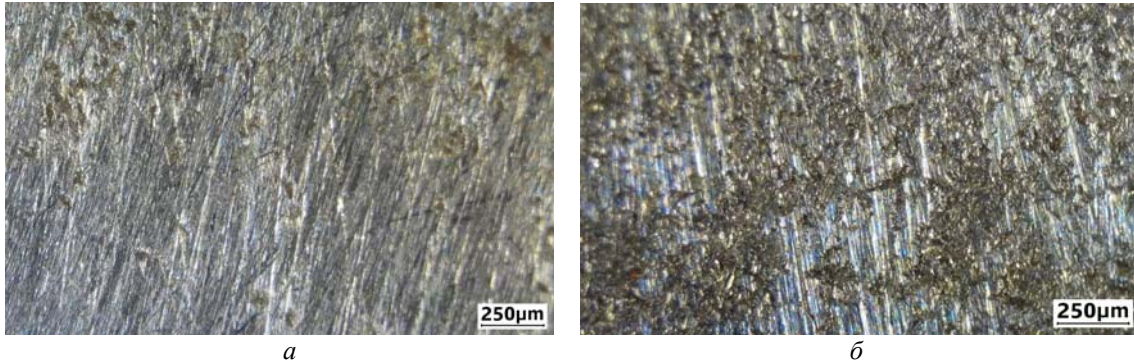


Рис. 4. Поверхность съёмного литого образца после 30 циклов AFM: а – вогнутый; б – выгнутый

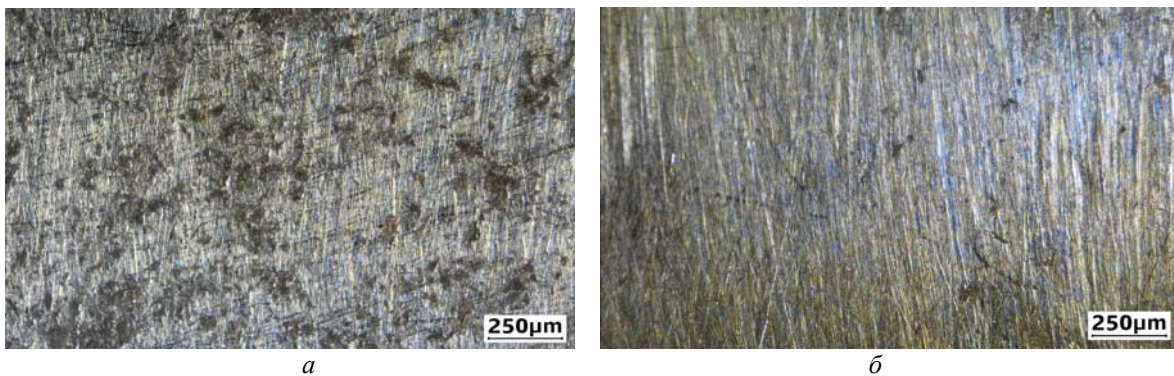


Рис. 5. Поверхность съёмного литого образца после 60 циклов AFM: а – вогнутый; б – выгнутый

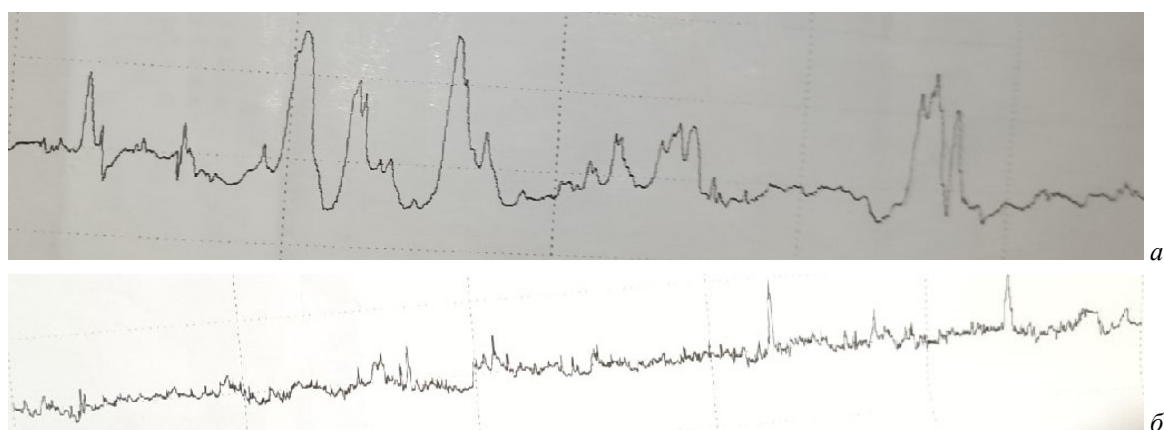


Рис. 6. Профиллограммы поверхности выгнутого съёмного литого образца:
а – до обработки; б – после 60 циклов AFM

Таблица 1. Показатели изменения шероховатости и микротвёрдости поверхности образцов от количества циклов обработки

Показатель	До AFM	30 циклов	60 циклов
Вогнутые образцы			
Микротвёрдость <i>HRC</i>	38,5...40,4	41,0...42,8	43,5...45,0
Шероховатость <i>Ra</i> , мкм	8,9...9,3	4,3...4,6	2,6...2,8
Выгнутые образцы			
Микротвёрдость <i>HRC</i>	39,5...40,5	41,5...43,3	44,5...45,5
Шероховатость <i>Ra</i> , мкм	8,7...9,1	4,2...4,5	2,4...2,6

Поверхность образцов до обработки (рис. 3) представлена литейной коркой с шероховатостью произвольного направления величиной $Ra = 8,7...9,1$ мкм (выгнутые образцы) и $Ra = 8,9...9,3$ мкм (вогнутые образцы). Микротвёрдость образцов варьировалась в интервале $38,5...40,5$ *HRC*, что превышает определяемую ОСТ 1 90005-91 твёрдость поверхности литых заготовок из стали 08X14Н7МЛ в диапазоне $33...39$ *HRC*.

После тридцати циклов обработки структура поверхности образцов (рис. 4) изменилась. Большая часть выступов исходной литейной корки удалена. На поверхности виден комплекс отдельных царапин. Приблизительная ширина царапин $5...20$ мкм. Наблюдаются отдельные выступы со срезанными вершинами, а также ряд впадин исходной литейной корки. Шероховатость поверхности имеет, как правило, произвольное направление, а её величина уменьшилась практически в два раза: $Ra = 4,2...4,5$ мкм (выгнутые образцы) и $Ra = 4,3...4,6$ мкм (вогнутые образцы). Микротвёрдость образцов возросла до $41,5...43,3$ *HRC* (выгнутые образцы) и до $41,0...42,8$ *HRC* (вогнутые образцы).

После 60 циклов AFM структура поверхности образцов (рис. 5) в основном представлена комплексом царапин, направление которых совпадает с направлением течения рабочей среды. Приблизительная ширина царапин $3...5$ мкм. Наблюдаются локальные зоны с остаточными впадинами исходной литейной корки. Шероховатость поверхности приобрела направление, параллельное направлению потока рабочей среды при обработке. Величина измеренной шероховатости для выгнутых образцов $Ra = 2,4...2,6$ мкм, для вогнутых образцов $Ra = 2,6...2,8$ мкм. Микротвёрдость образцов достигла величины $44,5...45,5$ *HRC* на выгнутых образцах и $43,5...45,0$ *HRC* на вогнутых образцах.

Профилограмма литейной корки (рис. 6, а) показывает комплекс местных выступов с разным средним шагом неровностей профиля по вершинам. Средняя высота выступов профиля R_p варьируется в пределах от 12 до 14 мкм. Глубина шероховатости сердцевин R_k изменяется в интервале от 10 до 12 мкм. При этом материальная составляющая $Mr1$, которая отделяет выступающие пики от основного профиля шероховатости, составляет всего 10%. Материальная составляющая $Mr2$, отделяющая глубокие впадины от основного профиля шероховатости, составляет 79%.

Профилограмма поверхности после 60 циклов обработки (рис. 6, б) свидетельствует о существенном выравнивании профиля и увеличении его опорной длины. Показатель R_p уменьшился до диапазона от 3,2 до 4 мкм, а показатель R_k также снизился до значений от 2,5 до 3,2 мкм. Материальная составляющая $Mr1$ увеличилась до 11%, а $Mr2$ – до 85%.

Обсуждение результатов исследования

Известно, что единичное абразивное зерно при обработке абразивным потоком представляет собой многогранный керамический инструмент. При его контакте с микронеровностями обрабатываемой поверхности могут возникать различные виды контакта. Вид контакта зависит от твёрдости и шероховатости обрабатываемой поверхности и абразивного зерна. Как правило, на уровне микровыступов зерна происходят микрорезание и пластическое оттеснение, а на уровне абразивного зерна – упругая и пластическая деформации [9].

Изображение единичного зерна электрокорунда белого 25А F70 на поверхностной литейной корке вогнутого образца (рис. 7) демонстрирует, что из-за больших размеров абразивное зерно может одновременно вступать в контакт с несколькими микронеровностями. При этом на каждой микронеровности образуется элементарная фактическая площадь касания A_{ni} . Суммарная площадь контактных зон микронеровностей абразивного зерна и обрабатываемой поверхности образует фактическую площадь касания [13].



Рис. 7. Единичное зерно электрокорунда белого 25А F70 на поверхностной литейной корке вогнутого образца

Схема процесса контактного взаимодействия абразивного зерна с микронеровностями обрабатываемой поверхности (рис. 8) показывает, что составляющие силы резания обусловлены касательными и нормальными напряжениями, возникающими в потоке рабочей среды. При установившемся течении величина напряжений зависит от градиента скорости потока от точки контакта абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью к верхней грани зерна.

Возникновение градиента скорости потока вызвано как гидродинамикой процесса (условие «прилипания» потока к стенке канала), так и внешним трением при контакте зерна с обрабатываемой поверхностью.

Известные из трибологии условия перехода с одного вида контакта на другой при *AFM* получены на основе общеизвестных зависимостей трибологии [13 – 15]. Эти условия выполняются на всех уровнях фактической площади касания. При этом составляющие силы резания P_z и P_y могут достигать величин от 2,1 Н до 2,28 Н на контурной площади касания [16].

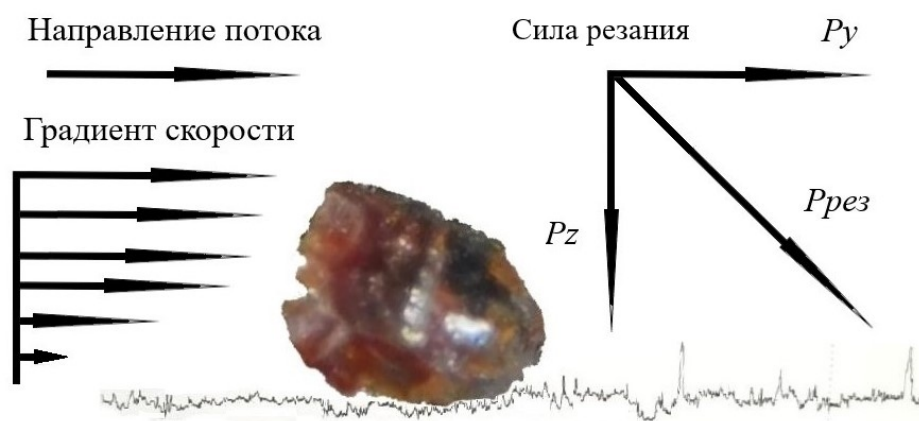


Рис. 8. Схема процесса контактного взаимодействия абразивного зерна с микронеровностями обрабатываемой поверхности

Результаты экспериментальных исследований позволяют разделить процесс обработки абразивным потоком литых образцов на два этапа, различающихся между собой особенностями контакта абразивного зерна и обрабатываемой поверхности.

Структура литейной корки определяет условия обработки на первом (черновом) этапе. Она отличается существенной неравномерностью высоты и распределения выступов. В контакт вступает некоторая часть зерна, при этом элементарные фактические площади касания A_{fi} образуются как на вершинах, так и боковых поверхностях местных выступов корки. На этих участках преобладают механизмы микрорезания на уровне отдельных микровыступов зерна. Характер царапин на поверхности литого образца (рис. 9) свидетельствует, что вышеназванные микровыступы могут иметь различные размеры.

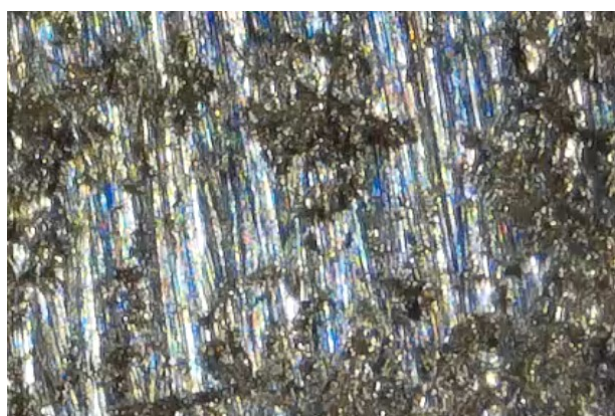


Рис. 9. Царапины на поверхности литого образца

Впадины профиля не меняют своей конфигурации, что говорит об отсутствии процесса пластической деформации оснований выступов профиля шероховатости. Возрастание величины микротвёрдости образца на этом этапе *AFM* вызвано увеличением процента материальной составляющей средней линии профиля шероховатости из-за снятия слоя металла с локальных выступов литейной корки.

В процессе обработки постепенно удаляется материал с вершущек локальных выступов и с боковых поверхностей. При этом элементарные фактические площади касания A_{ri} уменьшаются.

После того как слой литейной корки удаляется практически полностью (присутствуют лишь отдельные остаточные впадины) меняется механизм контактных взаимодействий. Абразивное зерно контактирует уже не с материалом корки, а с основным металлом заготовки в условиях равновесного контакта потока рабочей среды и поверхностного слоя образца. В контакт вступает существенно меньшая часть абразивного зерна, при этом съём металла (микрорезание) осуществляется на уровне её микровыступов, а площадь A_{ri} становится ещё меньше. Уменьшение размеров элементарных фактических площадок касания при постоянной силе резания ведёт к росту величины фактического давления в контакте. Это обуславливает проявление пластических деформаций локальных участков поверхностного слоя в зоне контакта.

Необходимо учитывать влияние изменения условий контактных взаимодействий на условия обработки. В связи с этим обстоятельством выделен второй (окончательный) этап обработки, на котором формируется требуемое состояние поверхностного слоя. Это предположение подтверждается глубиной и шириной рисок на обработанной поверхности (см. рис. 5, б). Шероховатость поверхности принимает параллельное направление. Пластическая деформация в ходе обработки ведёт к деформационному упрочнению приповерхностной области и появлению остаточных сжимающих напряжений.

Описанные выше результаты обработки характерны как для вогнутых, так и для выгнутых образцов. Следовательно их можно отнести и к обработке криволинейного канала, имитирующего закрытый канал (см. рис. 1).

Заключение

Анализ результатов исследования показал, что обработку абразивным потоком съёмных литых образцов, имитирующих перо лопатки, необходимо разделить на два этапа. На первом (черновом) этапе обработки удаляется большая часть исходной литейной корки. На втором этапе литейная корка удаляется полностью и происходит снятие слоя основного металла с формированием требуемого состояния поверхности.

Основным механизмом снятия материала с поверхности литой заготовки является микрорезание на уровне элементарных фактических площадей касания отдельных микровыступов зерна с вершущками и боковыми поверхностями локальных выступов литейной корки на первом этапе и основным металлом заготовки – на втором этапе.

В процесс *AFM* по мере удаления материала происходит постепенное уменьшение размеров элементарных фактических площадок касания A_{ri} , что при постоянной силе резания ведёт к росту величины фактического давления в контакте. Это обуславливает проявление пластических деформаций локальных участков поверхностного слоя в зоне контакта на втором этапе обработки. Различные условия контактных взаимодействий при обработке на первом и втором этапе необходимо учитывать при регулировании режимов обработки абразивным потоком.

В ходе исследований 60 циклов обработки обеспечили улучшение шероховатости поверхности от $Ra = 8,7 \dots 9,3$ мкм до $Ra = 2,4 \dots 2,8$ мкм, а также увеличение микро-

твёрдости образцов от 38,5...40,5 до 43,5...45,5 HRC. При этом шероховатость обработанной поверхности приобрела направление, параллельное направлению потока рабочей среды.

Обработку абразивным потоком высоковязкой средой рекомендуется применять для улучшения шероховатости и повышения микротвёрдости внутренних поверхностей закрытых каналов заготовок из литейных аустенитно-мартенситных сталей.

Библиографический список

1. Сысоев С.К., Сысоев А.С. Экструзионное хонингование деталей летательных аппаратов: теория, исследование, практика. Красноярск: Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М.Ф. Решетнёва, 2005. 219 с.

2. Зубарев Ю.М. Специальные методы обработки заготовок в машиностроении. Санкт-Петербург: Лань, 2015. 400 с.

3. Оборин Л.А., Тягунов Г.В., Черепанов А.И. Влияние способа выплавки жидкой стали 08X14H7МЛ (ВНЛ-1) на степень её равновесности и параметры термовременной обработки расплава // *Литейщик России*. 2013. № 7. С. 25-29.

4. McCarty R.W. Method of honing by extruding. Patent US, no. 3521412, 1970. (Publ. 21.07.1970)

5. Rhoades L.J. Abrasive flow machining for automatic surface finishing and capacitance technology for in-process surface and dimensional metrology // In: *Surface Engineering*. Dordrecht: Springer, 1990. P. 456-467. DOI: 10.1007/978-94-009-0773-7_46

6. Сысоев С.К., Сысоев А.С., Левко В.А., Снетков П.А., Лубнин М.А. Обеспечение точности расхода компонентов топлива через каналы деталей, обработанных экструзионным хонингованием // *Технология машиностроения*. 2007. № 6. С. 48-52.

7. Сысоева Л.П., Сысоев С.К., Сысоев А.С. Методика обеспечения качества каналов деталей летательных аппаратов с использованием абразивно-экструзионной обработки // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнёва*. 2013. № 2 (48). С. 228-232.

8. Tao Z., Yaoyao S., Xiaojun L., Tianran H. Optimization of abrasive flow polishing process parameters for static blade ring based on response surface methodology // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2016. V. 30, no. 3. P. 1085-1093. DOI: 10.1007/s12206-016-0213-7

9. Левко В.А., Савин Д.И., Литовка О.В. Контактные взаимодействия при обработке абразивным потоком средой высокой вязкости заготовок из сплавов порошкового молибдена // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24, № 1(150). С. 36-51. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-1-36-51

10. Petare A.C., Jain N.K. A critical review of past research and advances in abrasive flow finishing process // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. V. 97, Iss. 1-4. P. 741-782. DOI: 10.1007/s00170-018-1928-7

11. Levko V.A., Litovka O.V., Savin D.I., Terjaev N.S. Review of previous Russian studies in the abrasive flow machining // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. V. 1155, Iss. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/1155/1/012029

12. Теряев Н.С., Володин А.Ю. Особенности абразивно-экструзионной обработки труднообрабатываемых сплавов после литья по выплавляемым моделям // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2015. Т. 1, № 11. С. 43-45.

13. Левко В.А. Контактные процессы при абразивно-экструзионной обработке // *Металлообработка*. 2008. № 3 (45). С. 19-23.

14. Gorana V.K., Jain V.K., Lal G.K. Forces prediction during material deformation in abrasive flow machining // *Wear*. 2006. V. 260, Iss. 1-2. P. 128-139. DOI: 10.1016/j.wear.2004.12.038

15. Shao Y., Cheng K. Integrated modelling and analysis of micro-cutting mechanics with the precision surface generation in abrasive flow machining // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. V. 105, Iss. 11. P. 4571-4583. DOI: 10.1007/s00170-019-03595-4

16. Левко В.А. Расчёт шероховатости поверхности при абразивно-экструзионной обработке на основе модели контактных взаимодействий // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2009. № 1. С. 59-62.

ABRASIVE FLOW MACHINING OF SPECIMENS OF CAST BILLETS FROM AUSTENOMARTENSITIC STEEL WITH HIGH-VISCOSITY MEDIA

© 2023

- V. A. Levko** Doctor of Science (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation; levkosaa@mail.ru
- N. S. Teryaev** Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation; nikolay-teryayev@mail.ru
- O. V. Litovka** Postgraduate Student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation; litovka.9518@gmail.com
- P. A. Ivanov** Postgraduate Student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation; Ivanov.pasch.iva@yandex.ru

The paper presents the results of research on abrasive flow machining of removable specimens of cast billets made of austenomartensitic steel placed in a simulator of a closed curvilinear channel. The change in the roughness and micro-hardness of the surface of the samples was evaluated. There are two stages of machining. At the first stage of machining, most of the casting skin is removed. At the second stage, the casting skin is removed completely and the base metal layer is removed. It was established that the main mechanism for removing material from the surface of a cast billet is microcutting at the level of elementary real areas of contact of individual grain micro-protrusions. According to the results of the experiments, it is recommended to use abrasive flow machining with highly viscous medium to improve the roughness and increase the micro-hardness of the inner surfaces of the closed channels of cast billets.

Abrasive flow machining; austenomartensitic steel; cast billet; high-viscosity media

Citation: Levko V.A., Teryaev N.S., Litovka O.V., Ivanov P.A. Abrasive flow machining of specimens of cast billets from austenomartensitic steel with high-viscosity media. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2023. V. 22, no. 3. P. 122-132. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-3-122-132

References

1. Sysoev S.K., Sysoev A.S. *Ekstruzionnoe khoningovanie detaley letatel'nykh apparatov: teoriya, issledovanie, praktika* [Extrusion honing of aircraft parts: theory, research, practice]. Krasnoyarsk: Siberian State Aerospace University Publ., 2005. 219 p.

2. Zubarev Yu.M. *Spetsial'nye metody obrabotki zagotovok v mashinostroenii* [Special methods of billet machining in mechanical engineering]. Saint-Petersburg: Lan' Publ., 2015. 400 p.
3. Oborin L.A., Tyagunov G.V., Cherepanov A.I. Influence of steel production 08H14N7ML (VNL-1) on the degree of its equilibrium parameters of heat melt processing. *Liteyshchik Rossii*. 2013. No. 7. P. 25-29. (In Russ.)
4. McCarty R.W. Method of honing by extruding. Patent US, no. 3521412, 1970. (Publ. 21.07.1970)
5. Rhoades L.J. Abrasive flow machining for automatic surface finishing and capacitance technology for in-process surface and dimensional metrology. *In: Surface Engineering*. Dordrecht: Springer, 1990. P. 456-467. DOI: 10.1007/978-94-009-0773-7_46
6. Sysoev S.K., Sysoev A.S., Levko V.A., Snetkov P.A., Lubnin M.A. Ensuring the accuracy of the flow of fuel components through the channels of parts processed by extrusion honing. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*. 2007. No. 6. P. 48-52. (In Russ.)
7. Sysoeva L.P., Sysoev S.K., Sysoev A.S. The technique for guarantee of quality of the aircraft detail channels with the use of abrasive flow machining process. *Vestnik SibGAU*. 2013. No. 2 (48). P. 228-232. (In Russ.)
8. Tao Z., Yaoyao S., Xiaojun L., Tianran H. Optimization of abrasive flow polishing process parameters for static blade ring based on response surface methodology. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2016. V. 30, no. 3. P. 1085-1093. DOI: 10.1007/s12206-016-0213-7
9. Levko V.A., Savin D.I., Litovka O.V. Powder molybdenum alloy workpieces contact interactions under abrasive flow machining by high viscosity media. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020. V. 24, no. 1 (150). P. 36-51. (In Russ.). DOI: 10.21285/1814-3520-2020-1-36-51
10. Petare A.C., Jain N.K. A critical review of past research and advances in abrasive flow finishing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. V. 97, Iss. 1-4. P. 741-782. DOI: 10.1007/s00170-018-1928-7
11. Levko V.A., Litovka O.V., Savin D.I., Terjaev N.S. Review of previous Russian studies in the abrasive flow machining. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. V. 1155, Iss. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/1155/1/012029
12. Teryaev N.S., Volodin A.Yu. Feature the abrasive flow machining of hard alloys after investment casting. *Aktual'nyye Problemy Aviatsii i Kosmonavтики*. 2015. V. 1, no. 11. P. 43-45. (In Russ.)
13. Levko V.A. Contact processes in abrasive-extrusion processing. *Metalloobrabotka*. 2008. No. 3 (45). P. 19-23. (In Russ.)
14. Gorana V.K., Jain V.K., Lal G.K. Forces prediction during material deformation in abrasive flow machining. *Wear*. 2006. V. 260, Iss. 1-2. P. 128-139. DOI: 10.1016/j.wear.2004.12.038
15. Shao Y., Cheng K. Integrated modelling and analysis of micro-cutting mechanics with the precision surface generation in abrasive flow machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. V. 105, Iss. 11. P. 4571-4583. DOI: 10.1007/s00170-019-03595-4
16. Levko V.A. Calculation of surface roughness in abrasive-extrusion machining on the basis of contact-interaction model. *Russian Aeronautics*. 2009. V. 52, Iss. 1. P. 94-98. DOI: 10.3103/S1068799809010164