

- ных системах авиационных двигателей// Тез. докл. международного российско- китайского науч.-техн. симпозиума по авиационным двигателям.- Китай, Нанжинг,1997.-С.141.
5. Петрусеви́ч А.И., Генкин М.Д., Гринкевич В.К. Динамические нагрузки в зубчатых передачах с прямозубыми колесами. М.: АН СССР, 1958.-132с.
 6. Скубачевский Г.С. Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей. М.: Машиностроение, 1981.-550с.
 7. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: Справочник. - М.:Машиностроение, 1993. – 640 с.
 8. Ломакин А.А. Центробежные и осевые насосы.- М.: Машиностроение, 1966 – 364 с.
 9. Пфлейдерер К. Лопаточные машины для жидкостей и газов.- М.: Машгиз, 1960 – 682 с.

ФОРМИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ У СТАЛЕЙ 30ХГСН2А, ЭП517-Ш И ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ20 ПРИ КРУГЛОМ НАРУЖНОМ ШЛИФОВАНИИ

Скуратов Д.Л.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Известно, что циклическая долговечность деталей зависит не только от материала, из которого они изготовлены, но в значительной степени и от состояния поверхностного слоя, формируемого в процессе обработки. Важнейшими параметрами, характеризующими состояние поверхностного слоя и в наибольшей степени влияющими на предел выносливости деталей, являются величина остаточных напряжений и глубина их залегания.

Возникновению остаточных напряжений при механической обработке, как отмечают авторы работы [1], обычно способствуют три фактора: остаточные пластические деформации в поверхностном слое заготовки под действием сил резания; остаточные термопластические деформации в результате температурного влияния; фазовые или структурные изменения в поверхностном слое под действием температуры и пластического деформирования.

При механической обработке жаропрочных материалов структурно-фазовые изменения происходят не часто. Поэтому формирование остаточных напряжений в поверхностном слое заготовок из таких материа-

лов осуществляется в условиях одновременного воздействия силового и температурного факторов.

По мнению авторов работы [1], в зависимости от механических свойств обрабатываемого материала, вида обработки, режима резания, охлаждения, геометрии инструмента совместное влияние всех этих факторов имеет свои специфические особенности. В одних случаях температурное и силовое поля приводят к остаточным пластическим деформациям одного знака, в других - к деформациям разного знака. Если знаки совпадают, возникают растягивающие остаточные напряжения. При разных знаках конечный результат зависит от фактора с преобладающим влиянием (силового или температурного).

Современные представления механизма формирования остаточных напряжений основаны на использовании принципов аддитивности, то есть суммирования деформаций пластичности, упругости и ползучести [2].

В работе [3] проф. Б.А. Кравченко представлена теория формирования поверхностного слоя, в основу которой положено комплексное влияние относительных деформаций на процесс образования остаточных напряжений. На базе данной теории проф. Н.В. Носовым предложен механизм образования остаточных напряжений при шлифовании, который основан на принципе суперпозиции деформаций от силового поля стружкообразования и силового поля, создаваемого режущими и давящими зёрнами круга. При этом роль температуры шлифования в формировании остаточных напряжений проявляется через разупрочнение материала и, следовательно, увеличение его пластических свойств [4]. По мнению Н.В. Носова, предложенный механизм носит качественный характер, с помощью которого можно установить взаимовлияние силовых полей, определить вклад каждого фактора и предложить пути регулирования величины и знака остаточных напряжений.

Шлифование колец из сталей 30ХГСН2А, ЭП517-Ш и титанового сплава ВТ20 осуществлялось на универсальном круглошлифовальном станке модели 312М сплошными, прерывистыми, композиционными и комбинированными кругами ПП300х32х127.

Идеи создания прерывистых и композиционных шлифовальных кругов принадлежат коллективам авторов соответственно во главе с А.В. Якимовым и В.Т. Чалым. Рабочая поверхность прерывистых шлифовальных кругов выполнена в виде чередующихся режущих выступов и впадин. У композиционных шлифовальных кругов впадины на рабочей поверхности круга заполнены твердой смазкой. Комбинированные шлифовальные круги [5] представляют собой симбиоз прерывистых и композиционных кругов. В смазывающе-охлаждающих элементах этих

кругов перед режущими выступами выполнены впадины.

В качестве образцов для определения окружных остаточных напряжений использовались кольца с наружным диаметром 60 мм, внутренним диаметром 52 мм и шириной 10 мм. Для определения осевых остаточных напряжений использовались пластины длиной 70 мм, шириной 8 мм и толщиной 2,5 мм, которые вырезались из обработанных втулок с наружным диаметром 60 мм внутренним диаметром 55 мм и длиной 70 мм.

Остаточные напряжения в образцах рассчитывались по измеряемым деформациям образцов, после послойного удаления с их поверхности напряженных слоев. Удаление напряженных слоев материала со стальных (30ХГСН2А, ЭП517-Ш) образцов осуществлялось путем анодного травления, а с титанового сплава ВТ20 – путем химического травления (без тока), так как титановые сплавы при анодном травлении склонны к наводороживанию [6], что вносит дополнительные погрешности в определение остаточных напряжений.

Деформация образцов (колец и пластин) измерялась ежеминутно с помощью специальной аппаратуры [7] в процессе непрерывного анодного или химического травления.

Процесс анодного травления образцов из сталей 30ХГСН2А и ЭП517-Ш происходил на режимах, при которых плотность тока не превышала 15...20 ампер на квадратный дециметр. При такой плотности тока и объеме электролита, равным 20 литрам, температура в процессе электрополирования практически не изменялась, то есть тем самым поддерживалась постоянная скорость съема материала.

Для травления указанных сталей применялся универсальный электролит следующего состава: ортофосфорная кислота – 65 %, серная кислота – 15 %, хромный ангидрид – 5 %, вода – 15 %.

Химическое травление титанового сплава ВТ20 осуществлялось в растворе: азотная кислота – 30 %, плавиковая кислота – 2 %, вода – 68 %.

Результаты исследования остаточных приведены на рис. 1-4.

Исследование показало, что при шлифовании колец и втулок из сталей 30ХГСН2А, ЭП517-Ш и титанового сплава ВТ20 в поверхностном слое формируются растягивающие окружные и преимущественно сжимающие осевые остаточные напряжения. Возникновение таких остаточных напряжений обусловлено воздействием силового напряженного поля и напряженного поля, вызываемого температурой шлифования, при доминирующем влиянии первого поля. При этом следует отметить, что на величину и знак остаточных напряжений у некоторых образцов существенное влияние оказали структурные и фазовые изменения, произошедшие в поверхностном слое. Большинство образцов со структурными и

фазовыми изменениями были обработаны в основном сплошными кругами на интенсивных режимах шлифования.

Экспериментально установлено, что конструкция шлифовального круга оказывает существенное влияние на величину, а при определенных условиях и на знак остаточных напряжений. Так, например, при шлифовании образцов из стали 30ХГСН2А наибольшие значения растягивающих окружных остаточных напряжений имели место при работе сплошными кругами, а наименьшие – при работе композиционными кругами (см. рис. 1). При этом независимо от конструкции круга увеличение поперечной подачи приводит к росту растягивающих окружных остаточных напряжений, причем более интенсивно у колец, обработанных сплошными кругами, и менее интенсивно у колец, обработанных кругами с прерывистой режущей поверхностью.

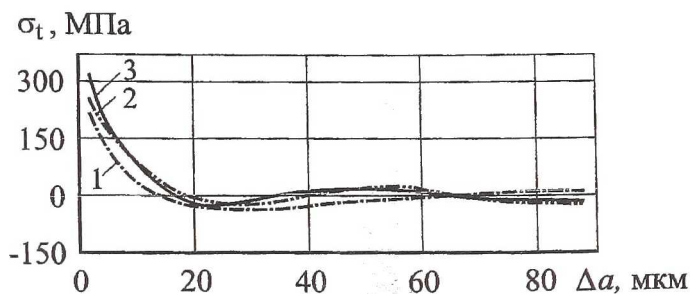
Менее интенсивный рост растягивающих окружных остаточных напряжений у образцов, обработанных кругами с прерывистой режущей поверхностью, при увеличении поперечной подачи объясняется, по-видимому, снижением степени влияния силового поля стружкообразования. Это обусловлено тем, что хотя средние значения составляющих силы резания при работе кругами с прерывистой режущей поверхностью меньше, чем при шлифовании сплошными кругами на этих же режимах, нагрузка, действующая на каждое зерно, у кругов с прерывистой режущей поверхностью выше из-за меньшего количества зерен участвующих в работе. Поэтому процесс самозатачивания у прерывистых, композиционных и комбинированных кругов

происходит более интенсивно, а это приводит к тому, что многие зерна разрушаются раньше, чем происходит полное срезание стружки в зоне контакта круга с заготовкой. В результате этого роль силового поля стружкообразования, способствующего росту окружных растягивающих остаточных напряжений, несколько снижается. При этом пластическая деформация поверхностного слоя, вызываемая режущими и давящими зернами, остается прежней.

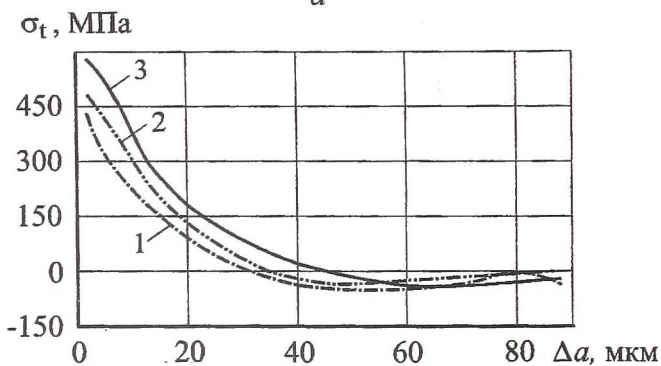
Росту окружных остаточных напряжений способствовало также образование вторичных структур в поверхностном слое образцов, плотность которых - выше, а удельный объем - ниже исходного материала. Уменьшение объема вторичных структур сопровождается укорочением поверхностного слоя и, вследствие сопротивления нижележащих слоев с исходной структурой, формированием остаточных напряжений растяжения [1]. Однако следует отметить, что при шлифовании образцов из стали 30ХГСН2А композиционными кругами образование вторичных структур отпуска наблюдалось только при подаче, равной 0,05 мм/дв.ход, а при шлифовании образцов комбинированными кругами эти же структуры

имели место как при $S_{2x} = 0,03$ мм/дв.ход, так и $S_{2x} = 0,05$ мм/дв.ход. Причем толщина отпущенного слоя у образцов, обработанных комбинированными кругами при $S_{2x} = 0,05$ мм/дв.ход, была больше, чем после шлифования композиционными кругами на этой же подаче. Обработка образцов сплошными кругами при подачах, равных 0,03 и 0,05 мм/дв.ход, сопровождалась возникновением структур вторичной закалки, которые, как показало исследование, оказывают более интенсивное влияние на рост окружных остаточных напряжений.

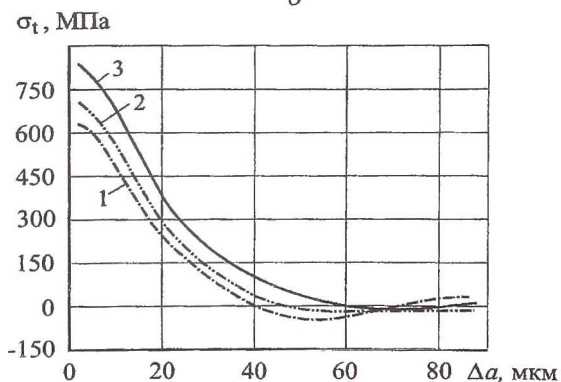
Как уже отмечалось, при шлифовании образцов из стали 30ХГСН2А в их поверхностном слое чаще всего формируются сжимающие осевые остаточные напряжения (см. рис. 2), хотя в определенных случаях могут возникать и остаточные осевые напряжения растяжения. Так у образцов, обработанных композиционными кругами, увеличение поперечной подачи от 0,01 до 0,03 мм/дв.ход сопровождается ростом сжимающих окружных остаточных напряжений, максимум которых увеличивается от $\sigma_{o\max} = -490$ МПа до $\sigma_{o\max} = -680$ МПа. Дальнейшее увеличение поперечной подачи до 0,05 мм/дв.ход приводит к снижению величины и глубины залегания этих напряжений ($\sigma_{o\max} = -500$ МПа, $\Delta a = 15-17$ мкм). При шлифовании образцов комбинированными и сплошными кругами снижение уровня сжимающих и увеличение уровня растягивающих осевых остаточных напряжений наблюдается, начиная с подачи, равной 0,03 мм/дв.ход. Однако при $S_{2x} = 0,03$ мм/дв.ход у образцов, обработанных комбинированными кругами, $\sigma_{o\max} = -400$ МПа, а у образцов, обработанных сплошными кругами, величина сжимающих окружных остаточных напряжений не превышает $\sigma_o = -200$ МПа. При этом уровень растягивающих осевых остаточных напряжений существенно возрастает, достигая максимума $\sigma_{o\max} = +500$ МПа на глубине 17...20 мкм. При $S_{2x} = 0,05$ мм/дв.ход у образцов, обработанных комбинированными и сплошными кругами, сжимающие осевые остаточные напряжения в поверхностном слое практически отсутствуют, а максимумы растягивающих окружных остаточных напряжений соответственно составили $\sigma_{o\max} = +480$ МПа и $\sigma_{o\max} = +700$ МПа. Такой характер изменения величины и знака $\sigma_{o\max}$ связан с возникновением вторичных структур в поверхностном слое заготовок, несмотря на повышение интенсивности с ростом поперечной подачи силового поля, создаваемого зернами абразивного круга, и, следовательно, уровня пластической деформации поверхностного слоя.



a

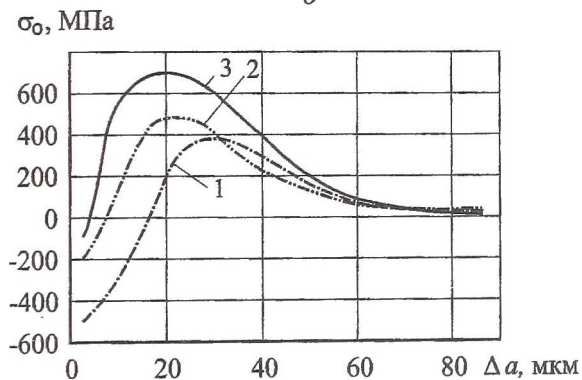
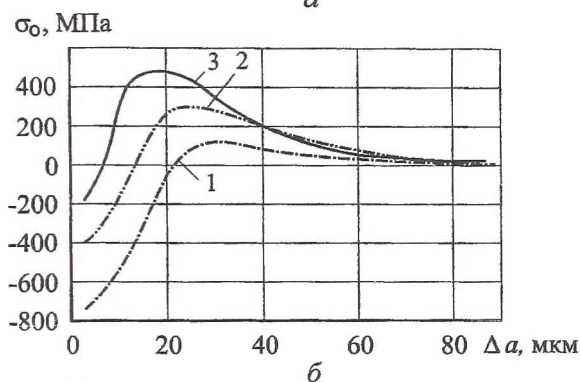
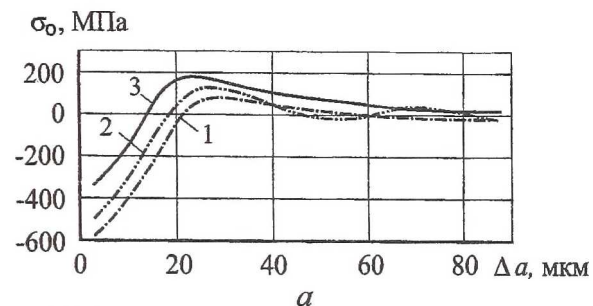


b



v

Рис. 1. Влияние поперечной подачи и конструкции кругов на величину окружных остаточных напряжений у образцов из стали 30ХГСН2А:
 а - $S_{2x} = 0,01$ мм/дв.ход, б - $S_{2x} = 0,03$ мм/дв.ход, в - $S_{2x} = 0,05$ мм/дв.ход; круги 25A25СМ27К5: 1 – композиционный, 2 – комбинированный, 3 – сплошной; режим шлифования: $v_k = 30$ м/с, $v_s = 30$ м/мин, $S_{np} = 0,5$ м/мин



в

Рис. 2. Влияние поперечной подачи и конструкции кругов на величину осевых остаточных напряжений у образцов из стали 30ХГСН2А:

а - $S_{2x} = 0,01$ мм/дв.ход, б - $S_{2x} = 0,03$ мм/дв.ход, в - $S_{2x} = 0,05$ мм/дв.ход; круги 25А25СМ27К5: 1 – композиционный, 2 – комбинированный, 3 – сплошной; режим шлифования: $v_k = 30$ м/с, $v_s = 30$ м/мин,

$$S_{np} = 0,5 \text{ м/мин}$$

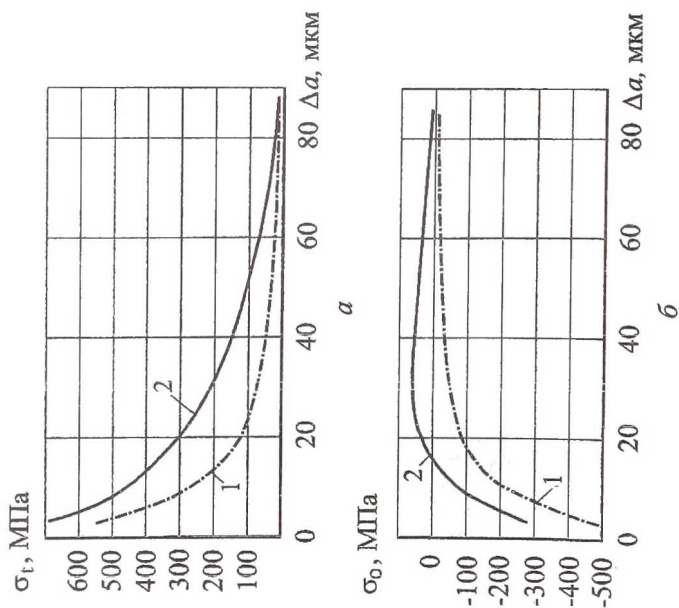


Рис. 3. Влияние конструкции кругов на величину окружных (а) и осевых (б) остаточных напряжений при шлифовании образцов из стали ЭП517-Ш: круги 25А25М37К5: 1 - композиционный; 2 - сплошной; режим: $v_k = 30$ м/с, $v_3 = 25$ м/мин, $S_{пр} = 1$ м/мин, $S_{2x} = 0,03$ мм/дв.ход

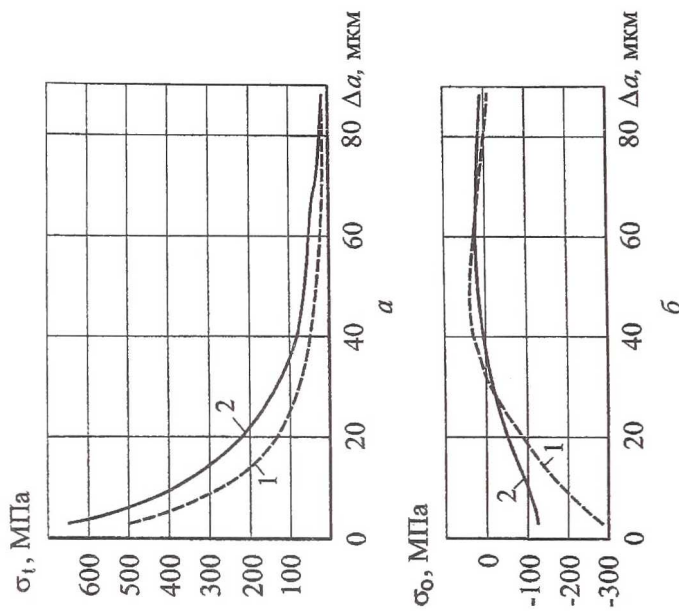


Рис. 4. Влияние конструкции кругов на величину окружных (а) и осевых (б) остаточных напряжений при шлифовании образцов из титанового сплава ВТ20: круги 63С25М36К5: 1 - прерывистый; 2 - сплошной; режим: $v_k = 35$ м/с, $v_3 = 30$ м/мин, $S_{пр} = 0,5$ м/мин, $S_{2x} = 0,03$ мм/дв.ход

Установлено, что на величину и знак остаточных напряжений существенное влияние оказывают скорости вращения круга и заготовки. Влияние этих параметров режима резания на формирование остаточных напряжений было исследовано при шлифовании образцов из стали 30ХГСН2А.

Уменьшение скорости вращения шлифовального круга независимо от его конструкции приводит к снижению величины растягивающих окружных и повышению величины сжимающих осевых остаточных напряжений. Так уменьшение скорости резания с 30 до 15 м/с ($v_s = 30$ м/мин, $S_{пр} = 0,5$ м/мин, $S_{2х} = 0,05$ мм/дв.ход) позволило при работе сплошными кругами снизить величину $\sigma_{t, \max}$ с 840 до 370 МПа,

а при работе композиционными кругами – с 630 до 260 МПа. При этом у образцов, обработанных сплошными кругами, уровень максимальных сжимающих осевых остаточных напряжений увеличился с $\sigma_{o, \max} = -100$ МПа до $\sigma_{o, \max} = -430$ МПа, а уровень максимальных растягивающих осевых остаточных напряжений уменьшился с $\sigma_{o, \max} = +700$ МПа до $\sigma_{o, \max} = +410$ МПа. Снижение скорости резания при работе композиционными кругами позволило повысить максимальную величину сжимающих осевых остаточных напряжений с $\sigma_{o, \max} = -500$ МПа до $\sigma_{o, \max} = -870$ МПа.

Уменьшение скорости резания при работе сплошными кругами позволило перейти из зоны вторичной закалки в зону вторичного отпуска, а при работе композиционными кругами свести вероятность возникновения вторичных структур практически к нулю. Вместе с тем следует отметить, что снижение скорости вращения круга, по мнению многих авторов, увеличивает его износ [8, 9, 10, 11, 12] и шероховатость поверхности заготовок [8, 13, 14, 15].

Полученные результаты, показывающие влияние скорости вращения круга на величину и характер распределения остаточные напряжений, можно объяснить изменением сил резания и теплонапряженности процесса шлифования. Так, например, уменьшение скорости вращения круга приводит к повышению сил резания и, следовательно, силового поля, создаваемого зернами круга, и снижению теплонапряженности процесса обработки.

При проведении исследования скорость вращения заготовок из стали 30ХГСН2А варьировалась в пределах от 10 до 50 м/мин. Это связано с тем, что большинство деталей, изготавливаемых из стали 30ХГСН2А, являются крупногабаритными, например, стойки и цилиндры шасси самолетов, поэтому осуществление процесса шлифования при вы-

соких частотах вращения заготовок вызывает определенные сложности.

Исследование показало, что увеличение скорости вращения заготовки с 10 до 50 м/мин ($v_k = 30$ м/с, $S_{np} = 0,5$ м/мин, $S_{2x} = 0,03$ мм/дв.ход) позволило уменьшить величину максимальных окружных остаточных напряжений $\sigma_{t, \max}$ с 710 до 480 МПа при работе сплошными кругами и с 540 до 360 МПа при работе композиционными кругами. Полученные результаты также объясняются повышением интенсивности силового поля и снижением теплонапряженности процесса шлифования с ростом скорости вращения заготовки.

Приведенные результаты исследования остаточных напряжений у образцов из стали 30ХГСН2А достаточно хорошо коррелируют с данными, представленными в работах [1, 16].

При шлифовании образцов из стали ЭП517-Ш и титанового сплава BT20 использование шлифовальных кругов с прерывистой режущей поверхностью также позволило существенно улучшить состояние поверхностного слоя.

Как видно из рис. 3, у образцов, обработанных композиционными кругами максимальный уровень растягивающих окружных остаточных напряжений в 1,25 раза меньше (см. рис. 3, а), а максимальный уровень сжимающих осевых остаточных напряжений в 1,75 раза больше (см. рис. 3, б), чем у образцов, обработанных сплошными кругами такой же характеристики и на таком же режиме. Подобные результаты получены при шлифовании образцов из титанового сплава BT20 сплошными и прерывистыми абразивными кругами с характеристикой 63С25М36К5 (см. рис. 4).

Снижение величины растягивающих окружных остаточных напряжений и повышение величины сжимающих осевых остаточных напряжений при обработке образцов из стали ЭП517-Ш и титанового сплава BT20 кругами с прерывистой режущей поверхностью, как показало исследование, обусловлено теми же самыми причинами, что при шлифовании образцов из стали 30ХГСН2А.

Таким образом, использование абразивных кругов с прерывистой режущей поверхностью на операциях круглого наружного шлифования позволяет существенно уменьшить величину растягивающих окружных остаточных напряжений и повысить максимальный уровень сжимающих осевых остаточных напряжений.

Список литературы

1. Кравченко Б.А., Митряев К.Ф. Обработка и выносливость высокопрочных материалов. Куйбышев: Куйбышев. кн. изд-во, 1968. 132 с.
2. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232 с.

3. Кравченко Б.А. Теория формирования поверхностного слоя деталей машин при механической обработке: Учебное пособие / Куйбышев. политехн. ин-т. Куйбышев, 1981. 90 с.
4. Носов Н.В. Повышение эффективности и качества абразивных инструментов путем направленного регулирования их функциональных показателей: Дис... док. техн. наук. Самара, 1997. 452 с.
5. Скуратов Д.Л., Трусов В.Н., Урывский А.Ф. Расчет температурного поля в деталях при внутреннем круглом шлифовании их кругами различных конструкций методом граничных элементов // Высокоэффективные методы механической обработки авиационных материалов: Сб. науч. тр. Самара, 1991. С. 13–24.
6. Обработка резанием жаропрочных и титановых сплавов / Н.И. Резников, Е.В. Бурмистров, И.Г. Жарков и др.; Под ред. Н.И. Резникова. М.: Машиностроение, 1972. 200 с.
7. Кононов В.К. Определение поверхностных остаточных напряжений с применением электронного автоматического самопишущего потенциометра ЭПП-09М // Высокоэффективные методы механической обработки жаропрочных и титановых сплавов: Межвуз. сб. Куйбышев, 1981. С. 99-105.
8. Лурье Г.Б. Шлифование металлов. М.: Машиностроение, 1969. 172 с.
9. Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей. М.: Машиностроение, 1984. 312 с.
10. Карой Д. Внутреннее шлифование кругами из эльбора // Резание и инструмент. Харьков, 1986. Вып.34. С. 36-38.
11. Кулаков Ю.М. и др. Предотвращение дефектов при шлифовании / Ю.М. Кулаков, В.А. Хрульков, И.В. Дунин-Барковский. М.: Машиностроение, 1975. 144 с.
12. Авдеев В.Г., Байор Б.Н. Обработка дорожек качения подшипников из стали ЭИ347-Ш и ДИ43-Ш кругами из эльбора // Синтетические алмазы. Киев, 1977. Вып.5. С. 47-50.
13. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов. М.: Машиностроение, 1974. 320 с.
14. Ящерицын П.И. Повышение эксплуатационных свойств шлифованных поверхностей. Минск: Наука и техника, 1966.
15. Михайлов В.А., Урывский Ф.П. Исследование шероховатости поверхности после скоростного охватывающего шлифования // Высокоэффективные методы обработки резанием жаропрочных и титановых сплавов: Межвуз. сб. Куйбышев, 1982. С. 85-89.
16. Шабалин Ю.А. Повышение качества поверхностного слоя и производительности обработки при шлифовании деталей шасси летательных аппаратов кругами с прерывистой рабочей поверхностью: Дис... канд. техн. наук. Самара, 1992. 160 с.