

*Д.Ю. Колодяжный<sup>1</sup>, С.О. Черкашин<sup>1</sup>✉, С.Г. Ляпусов<sup>2</sup>, В.П. Вороненко<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»; <sup>2</sup> АО «ММЗ «АВАНГАРД»

✉ Автор для корреспонденции

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБУЕМОЙ ТОЧНОСТИ ФОРМЫ ДЛИННЫХ ПЛОСКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ ВНС-2 ПРИ ПЛОСКОМ ШЛИФОВАНИИ ЗА СЧЕТ ИЗМЕНЯЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

### Аннотация

Данная статья раскрывает возможность обеспечения требуемой точности формы поверхностей длинных плоских деталей из стали ВНС-2 за счет назначения рациональных параметров режимов резания и термической обработки. Для хромоникелевых сталей мартенситного класса существует проблема их механической обработки ввиду большого количества легирующих элементов. Также у стали есть склонность к поглощению энергии, выделенной в ходе механической обработки, что в последствии может привести к накоплению энергии и проявлению её в виде деформации. Это сильно влияет на формируемые параметры точности формы обработанных поверхностей и, в ряде случаев, требуемое значение допуска не обеспечивается. Наклеп показывает соотношение возросшей твердости по отношению к исходной и может быть использован как один из способов контроля возникновения возможных остаточных деформаций в поверхностных слоях изделий. Немаловажное значение имеет микроструктура поверхностного слоя, которая оказывает значительное влияние на возникающие энергозатраты при механообработке, а также на возможное увеличение или уменьшение наклепа. Сделаны выводы по полученным результатам исследований.

**Ключевые слова:** мартенситная сталь, шлифование, микроструктура, наклеп, допуск.

**Для цитирования:** Колодяжный Д.Ю., Черкашин С.О., Ляпусов С.Г., Вороненко В.П. Обеспечение требуемой точности формы длинных плоских деталей из стали ВНС-2 при плоском шлифовании за счет изменяемых параметров режимов резания и термической обработки // Вестник МГТУ «Станкин». – 2025. – № 1 (72). – С. 66–72.

*D.Yu. Kolodyazhny<sup>1</sup>, S.O. Cherkashin<sup>1</sup>✉, S.G. Lyapusov<sup>2</sup>, V.P. Voronenko<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> MSUT “STANKIN”; <sup>2</sup> MMZ AVANGARD JSC

✉ Corresponding author

## ENSURING THE REQUIRED SHAPE ACCURACY OF LONG FLAT PARTS MADE OF VNS-2 STEEL DURING FLAT GRINDING DUE TO VARIABLE PARAMETERS OF CUTTING MODES AND HEAT TREATMENT

### Abstract

This article reveals the possibility of ensuring the required accuracy of the shape of the surfaces of long flat parts made of VNS-2 steel by assigning rational parameters of cutting modes and heat treatment. For chromium-nickel steels of the martensitic class, there is a problem of their mechanical processing due to the large number of alloying elements. Steel also has a tendency to absorb the energy released during machining,

which can subsequently lead to energy accumulation and its manifestation in the form of deformation. This strongly affects the formed parameters of the shape accuracy of the treated surfaces and, in some cases, the required tolerance value is not provided. The riveting shows the ratio of increased hardness relative to the initial one and can be used as one of the ways to control the occurrence of possible residual deformations in the surface layers of products. The microstructure of the surface layer is of no small importance, which has a significant impact on the resulting energy consumption during machining, as well as on the possible increase or decrease in the riveting. Conclusions are drawn based on the obtained research results.

**Keywords:** martensitic steel, grinding, microstructure, bending, tolerance.

**For citation:** Kolodyazhny D.Yu., Cherkashin S.O., Lyapusov S.G., Voronenko V.P. Ensuring the required shape accuracy of long flat parts made of VNS-2 steel during flat grinding due to variable parameters of cutting modes and heat treatment. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2025. No 1 (72). P. 66–72. (In Russian)

Введение

Для получения заданных параметров качества деталей используются различные технологические методы. В частности, рассматривают явление технологической наследственности [1], то есть анализируются операции, которые предшествовали рассматриваемой. Данный подход является комплексным и учитывает различные параметры, возникающие в ходе технологического процесса изготовления детали. Он остается актуальным и сегодня, а также может применяться для исследования влияния различных параметров, которые требуется контролировать [2]. Один из примеров, это обеспечение заданного параметра качества – точности формы получаемых поверхностей детали, на которую оказывает влияние энергия, расходуемая при механической обработке. Затраты энергии приводят к наклепу в поверхностном слое, который определяется отношением исходного значения твердости к полученному после механической обработки. Перенаклеп может привести к проявлению остаточных деформаций на поверхностных слоях изделия, что часто приводит к неисправимому браку в производстве.

Шлифование характеризуется большим числом факторов, влияющих на требуемый параметр точности. Оборудование играет значимую роль, так как оно должно гарантировать определенный уровень виброустойчивости и жесткости. При обработке важно правильно выбрать характеристики шлифовального круга: структуру, тип связи, ориентацию зерен, их форму и многое другое; так как они влияют на энергозатраты, возникающие при обработке деталей.

Методика проведения исследования

Существует проблема получения требуемой точности формы для длинных плоских деталей из стали ВНС-2 на операции плоского маятникового шли-

фования. После механической обработки за счет остаточных деформаций наблюдается изменение параметра точности, в данном случае – плоскостности, поверхностей деталей и в ряде случаев не обеспечивается требуемая, а именно 0,03 мм.

На остаточные деформации в значительной мере оказывают влияние режимы термообработки. В табл. 1 представлены параметры, которые используются для термической и механической обработок на данный момент на предприятии.

Была поставлена цель снизить величины погрешностей точности формы деталей за счет изменения режимов термической и механических обработок.

Основной критерий, который использовался для контроля – параметр плоскостности. Данный па-

Таблица 1  
Используемые режимы резания, термическая обработка и режущий инструмент

Параметр режима резания	Значение
Общий припуск, мм	0,50
Припуск на сторону, мм	0,25
Припуск, снимаемый за один ход, мм	0,0625
Продольная подача, м/мин	25
Скорость круга, м/с	14
Используемый шлифовальный круг	405x75x127x200x50 WA463111VBA5A
Режимы термической обработки:	Закалка: 1000°C±10°C; 30 минут; вода Старение: 500°C±10°C; 150 минут; воздух

Источник: составлено авторами на основании используемых режимов резания в текущем процессе изготовления

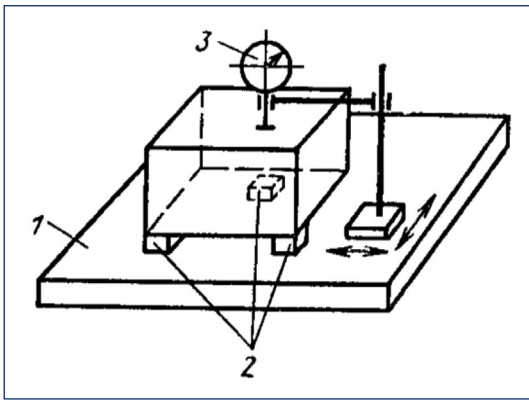


Рис. 1. Схема измерения плоскостности:  
1 – поверочная плита (1-1-1000х630 ГОСТ 10905-86);  
2 – подкладки (набор концевых мер КМД №1 кл.1 (1-н1) ЧИЗ); 3 – измерительная головка (индикатор Vogel для проверки плоскостей и параллелей) [3]

параметр контролировался по следующей схеме [3], показанной на *рис. 1*.

Эксперименты проводились на образцах из стали марки ВНС-2 (08Х15Н5Д2Т) по ТУ 14-1-2907-2019, которая является труднообрабатываемой, так как содержит большое количество легирующих элементов, таких как: хрома (~15%), никеля (~5%), медь (~2%), титан (~0,2%); и используется в самолетостроении и ракетостроении [4].

Также было решено использовать значение наклепа [5] для анализа появления возможных остаточных деформаций, вызванных разностью твердости поверхностных слоев образцов. Измерения проводились на приборе “Wilson Instruments Rockwell 574” при усилии 150 кгс, на каждом образце были исследованы 15 точек с обеих сторон (*рис. 2*) после термической и механической обработки.

Для получения возможности контроля параметра плоскостности и более полного понимания влияния термической обработки на наклеп, было принято

решение провести дополнительное исследование микроструктуры вышеуказанной стали. Исследование параметров микроструктуры [6] проводилось на микроскопе “ZEISS AX10” и контролировались следующие параметры: балл мартенсита, карбидная сетка, карбидная неоднородность и балл зерна.

План действий по проведению эксперимента состоял из 3 основных этапов [7, 8]:

1. Определение твердости и изучение микроструктуры образцов после подобранных режимов термической обработки.
2. Определение твердости и плоскостности образцов после плоского маятникового шлифования.
3. Расчет наклепа.

Также были изменены режимы резания, которые отображены в *табл. 2*.

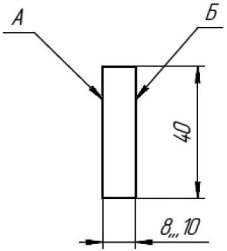
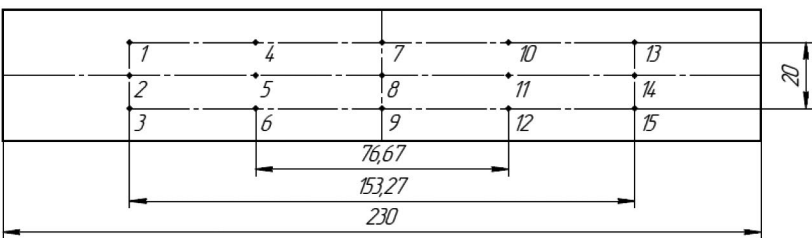
Было решено уменьшить диаметр шлифовального круга для минимизации возникающих вибраций. Уменьшение скорости вращения шлифовального круга обусловлено стремлением снижения интен-

Таблица 2

Режимы резания, режущий инструмент и СОТС

Параметр режима резания	Значение
Общий припуск, мм	1
Припуск на одну сторону, мм	0,5
Припуск за один ход, мм	0,004
Продольная подача, м/мин	8,5
Скорость круга, м/с	5
Используемая СОЖ:	NSK konentrat (водная)
Используемый шлифовальный круг	1A1 250x20x76x10 CBN30 B151 100NV 35

Источник: составлено авторами на основании подобранных режимов резания.



1. Измерения проводить по поверхностям “А” и “Б”.

Рис. 2. Схема для измерения твердости до и после плоского маятникового шлифования

Источник: составлено авторами на основании изготовленных образцов



Рис. 3. Станок плоскошлифовальный 3Е711В [9]

сивности износа. Увеличена глубина резания для возможного исключения предшествующих операций. Уменьшение значения снимаемого слоя за один ход круга требуется для минимизации вносимых тепловых и силовых воздействий.

Станок, на котором проводился эксперимент, представлен на рис. 3 [9].

Для оценки влияния наклепа было решено изменить режимы термической обработки на основании проведенного исследования (табл. 3) [10]. Вид закалки не менялся: был изменен только режим старения. Термическая обработка проводилась в электропечи ПКМ 3.6.2/11,5-ЭК.

Таблица 3

Подобранные режимы термической обработки для образцов из стали 08Х15Н5Д2Т

№ п/п	Режимы для закалки и старения (температура; время выдержки; среда охлаждения)
1	Закалка: 1000°С±10°С; 30 минут; вода / Старение: 200°С±10°С; 150 минут; воздух
2	Закалка: 1000°С±10°С; 30 минут; вода / Старение: 400°С±10°С; 150 минут; воздух
3	Закалка: 1000°С±10°С; 30 минут; вода / Старение: 600°С±10°С; 150 минут; воздух

Источник: составлено авторами на основании проведенного литературного исследования.

Первый этап

Образцы после проведения термической обработки исследовались на твердость и на изменение микроструктуры. Фотографии микроструктуры представлены на рис. 4.

Параметры микроструктуры представлены в табл. 4.



Рис. 4. Фотографии микроструктуры образцов после термической обработки по режимам табл. 3: а) режим № 1; б) режим № 2; в) режим № 3

Источник: составлено авторами на основании полученных фотографий с электронного микроскопа при проведении исследований

Таблица 4

Результаты исследования микроструктуры, полученные на микроскопе ZEISS AX10

№ п/п	Параметр	Значение параметров микроструктуры для образцов		
		Закалка: 1000°С±10°С; 30 минут; вода		
		Старение: 200°С±10°С; 150 минут; воздух	Старение: 400°С±10°С; 150 минут; воздух	Старение: 600°С±10°С; 150 минут; воздух
1	Балл мартенсита	6	-	-
2	Карбидная сетка (балл)	1	2	4
3	Карбидная неоднородность (балл)	1 по шкале Б	4 по шкале А	3 по шкале Б
4	Балл зерна	14	12	11

Источник: составлено авторами на основании проведенного литературного исследования.

Таблица 5

Величины плоскостности образцов из стали ВНС-2

Величины плоскостности образцов			
Закалка: 1000°C±10°C; 30 минут; вода			Требуемая плоскостность, мм
Старение: 200°C±10°C; 150 минут; воздух	Старение: 400°C±10°C; 150 минут; воздух	Старение: 600°C±10°C; 150 минут; воздух	
0,015	0,020	0,025	0,03

Источник: составлено авторами на основании проведенного исследования.

Наихудшие параметры продемонстрировал образец при температуре старения 600°C, а именно карбидная сетка и неоднородность. Наилучшие параметры имеет образец с температурой старения 200°C, а также был определен балл мартенсита, что говорит об отсутствии его у других образцов.

Второй этап

После проведения плоского маятникового шлифования образцы подверглись измерению твердости и плоскостности.

Величины плоскостности образцов представлены в табл. 5.

Требуемая величина плоскостности была соблюдена всеми образцами, но наименьшее значение было у образца при температуре старения 200°C.

Был проведен расчет значений наклепа по формуле (1) [5], и определены значения, представленные в табл. 6.

$$\varepsilon = \frac{HRC - HRC_0}{HRC_0}, \tag{1}$$

где  $\varepsilon$  – степень упрочнения;  $HRC$  – величина твердости после механической обработки;  $HRC_0$  – величина твердости после термической обработки (до механической обработки).

Выводы

При найденных режимах механической и термических обработок был обеспечен заданный параметр точности – плоскостность 0,03 мм.

Таблица 6

Величина наклепа при разных режимах термической обработки

Величина наклепа							
Значение наклепа при текущем режиме обработок	Закалка: 1000°C±10°C; 30 минут; вода						
	Старение: 200°C±10°C; 150 минут; воздух		Старение: 400°C±10°C; 150 минут; воздух		Старение: 600°C±10°C; 150 минут; воздух		
Поверхность А	Поверхность Б	Поверхность А	Поверхность Б	Поверхность А	Поверхность Б	Поверхность А	Поверхность Б
0,200	0,050	0,140	0,020	0,077	0,025	0,101	0,012

Источник: составлено авторами на основании проведенного исследования.



Исследование наклепа показывает, что присутствует его снижение по сравнению с применяемыми на производстве. Следует сказать о том, что перенаклеп на одной из плоскостей образца может приводить к возможной деформации через неопределенный промежуток времени.

Наилучший параметр плоскостности продемонстрировал образец при температуре старения 200°C, имея лучшие параметры микроструктуры (балла мартенсита, балла зерна, карбидной сетки и карбидной неоднородности). В тоже время образец при температуре старения 400°C имеет наименьший наклеп и, соответственно, меньшую вероятность появления остаточных деформаций.

Приведенный в статье план по проведению эксперимента можно будет использовать в качестве составной части планирования эксперимента по получению количественных взаимосвязей влияния на получаемую точность формы длинных плоских деталей в последующих работах.

### Библиографический список

1. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / А.М. Дальский, Б.М. Базров, А.С. Васильев и др. / Под ред. А.М. Дальского. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 364 с.: ил.
2. Яцерицын П.И., Рыжов Э.В., Аверченков В.И. Технологическая наследственность в машиностроении. Мн., «Наука и техника», 1977, 256 с.
3. Общетехнический справочник / Под ред. Е.А. Скороходова – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 415 с., ил.
4. ТУ 14-1-2907-2019 Сталь толстолистовая марки 08Х15Н5Д2Т (ЭП410), 08Х15Н5Д2Т-Ш (ЭП-410-Ш). Технические условия.
5. Безъязычный В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения: монография. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва – Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 356 с.: ил.
6. Атлас микроструктур черных и цветных металлов: учебное наглядное пособие / сост.: А.А. Андрушевич [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2012. – 100 с.
7. Фомин Е.В. Планирование экспериментального исследования обрабатываемости резанием альфа титановых сплавов / Е.В. Фомин, К.К. Снегирева // Вестник МГТУ «Станкин». – 2022. – № 1 (60). – С. 32–36. – EDN: MFUKDD.
8. Темпель О.А. Планирование эксперимента выбора оптимальных параметров процесса резания труднообрабатываемых материалов / О.А. Темпель, Ю.А. Темпель, Д.Е. Васьков // Вестник МГТУ «Станкин». – 2022. – № 4 (63). – С. 28–31. – EDN: SFOCEM.
9. Универсальный плоскошлифовальный станок 3Е711В: сайт. – URL: <http://stankos.ru/features/shlifovalnye-i-dovodochnye-polirovalnye-i-zatochnye-stanki/3e711v-detail> (дата обращения: 19.11.2024)
10. Внедрение технологичного коррозионно-стойкого материала взамен стали 07Х16Н6 для изготовления рабочих колес центробежных компрессоров / Е.Н. Поморцев, И.Г. Галиахметов, В.И. Чигарин [и др.] // Компрессорная техника и пневматика. – 2013. – № 5. – С. 44–47.

### References

1. Technological heredity in mechanical engineering production / A.M. Dalsky, B.M. Bazrov, A.S. Vasiliev, etc. / Edited by A.M. Dalsky. – M.: Publishing House of MAI, 2000. – 364 p.: ill.
2. Lizarditsyn P.I., Ryzhov E.V., Averchenkov V.I. Technological heredity in mechanical engineering. Mn., “Science and Technology”, 1977, 256 p.
3. General technical reference / Edited by E.A. Skorokhodov. 2nd ed., reprint. And additional. M.: Mechanical Engineering, 1982. 415 p., ill.
4. TU 14-1-2907-2019 Thick-sheet steel grades 08H15N5D2T (EP410), 08H15N5D2T-Sh (EP-410-Sh). Technical conditions.
5. Bezylagny, V.F. The method of similarity in mechanical engineering technology: monograph / V.F. Bezylagny. 2nd ed., ispr. And lop. Moscow; Vologda: Infra-Engineering, 2021. 356 p.: ill.
6. Atlas of microstructures of ferrous and non-ferrous metals: an educational visual aid / comp.: A.A. Andrushevich [et al.]. Minsk: BGATU, 2012. 100 p.
7. Fomin, E.V. Planning an experimental study of the machinability of cutting alpha titanium alloys / E.V. Fomin, K.K. Snegireva. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2022. No. 1 (60). P. 32–36. EDN: MFUKDD.
8. Tempel, O.A. Planning an experiment for choosing the optimal parameters of the cutting process of difficult-to-process materials / O.A. Tempel, Yu.A. Tempel, D.E. Vaskov. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2022. No. 4 (63). P. 28–31. EDN: SFOCEM.
9. Universal flat grinding machine 3E711B: website. URL: <http://stankos.ru/features/shlifovalnye-i-dovodochnye-polirovalnye-i-zatochnye-stanki/3e711v-detail> (date of access: 11/19/2024)
10. Introduction of technological corrosion-resistant material instead of steel 07X16H6 for the manufacture of impellers of centrifugal compressors / E.N. Pomortsev, I.G. Galiakhmetov, V.I. Chigarin [et al.]. *Compressor technology and pneumatics*. 2013. No. 5. P. 44–47.

**Информация об авторах**

**Колодяжский Дмитрий Юрьевич** – доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения, проректор по научной деятельности, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
kolod@mail.ru

**Черкашин Станислав Олегович** – аспирант кафедры технологии машиностроения, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
ct4ccher@yandex.ru

**Ляпусов Сергей Геннадьевич** – кандидат технических наук, заместитель главного технолога, АО «ММЗ «АВАНГАРД»  
lyapusov@yandex.ru

**Вороненко Владимир Павлович** – доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
vpvoronenko@yandex.ru

**Information about the authors**

**Kolodyazhny Dmitry Yurievich** – D.Sc. of Engineering, professor at the sub-department of “Mechanical Engineering Technology”, vice-rector for scientific activities, MSUT “STANKIN”  
kolod@mail.ru

**Cherkashin Stanislav Olegovich** – postgraduate student at the sub-department of “Mechanical Engineering Technology”, MSUT “STANKIN”  
ct4ccher@yandex.ru

**Lyapusov Sergey Gennadievich** – cand. Sc. of Engineering, deputy chief technologist, MMZ AVANGARD JSC  
lyapusov@yandex.ru

**Voronenko Vladimir Pavlovich** – D.Sc. of Engineering, professor at the sub-department of “Mechanical Engineering Technology”, MSUT “STANKIN”  
vpvoronenko@yandex.ru

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации и заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors made equivalent contributions to the publication and declare no conflict of interest.