

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.34>

## НАСЛЕДСТВЕННЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ОБРАБОТКИ

Научная статья

**Нестеренко Г.А.**<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0003-1528-4627;

<sup>1</sup> Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (nga112001[at]list.ru)

### Аннотация

Целью исследования являлось прогнозирование погрешности обработки нежестких деталей газотурбинных двигателей. В статье описан аналитический подход к оценке наличия и величины остаточных технологических напряжений в поверхностном слое нежестких обрабатываемых деталей. К числу таких деталей были отнесены диски, крыльчатки и лопатки компрессора газотурбинного двигателя (ГТД).

Исследования проводились в зоне упругой деформации элементов представленных изделий. Проводилась оценка возможного смещения полотна диска относительно его обода от воздействия остаточных напряжений внесенных в поверхностный слой.

Работа содержит практические рекомендации по снижению уровня остаточных напряжений и уменьшению погрешности обработки.

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, точность обработки, напряжения, поверхностный слой, режимы резания.

## HEREDITARY STRESSES AND THEIR INFLUENCE ON THE FORMATION OF PROCESSING ERROR

Research article

**Nesterenko G.A.**<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0003-1528-4627;

<sup>1</sup> Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

\* Corresponding author (nga112001[at]list.ru)

### Abstract

The aim of the study was to predict the machining error of non-rigid parts of gas turbine engines. The article describes an analytical approach to evaluate the presence and magnitude of residual technological stresses in the surface layer of non-rigid machined parts. The discs, impellers and compressor blades of a gas turbine engine (GTE) compressor were referred to such parts.

Studies were carried out in the elastic deformation zone of the elements of the presented products. The possible displacement of the disc blade relative to its rim from the effect of residual stresses introduced into the surface layer was evaluated.

The work contains practical recommendations for reducing the level of residual stresses and processing error.

**Keywords:** gas turbine engine, machining accuracy, stresses, surface layer, cutting modes.

### Введение

В машиностроении существует большая номенклатура деталей, которые имеют тонкостенные элементы. К ним относятся детали типа дисков, крыльчаток, лопаток, колец, фланцев и других. В работах [1], [2] указано, что сложность изготовления представленных деталей связана с их малой жесткостью. Это приводит к большим технологическим потерям, особенно на начальных этапах освоения технологии. Как известно [3], для уменьшения потерь необходимо снижать режимы резания, тем самым уменьшая силы резания. Но снижение режимов приводит к увеличению времени на обработку деталей, то есть производительность падает. Особенно ощутимы эти проблемы в авиационном производстве.

В результате совершенствования авиационной техники, в частности, двигателей летательных аппаратов, идет постоянная борьба за уменьшение массы всего изделия, а именно его узлов и деталей, таких как диски, крыльчатки и другие. Это достигается применением более легких материалов, а также уменьшением сечений и усложнением формы деталей. С уменьшением сечения деталей снижается их жесткость, что сильно усложняет процесс размерной обработки с заданной точностью из-за влияния сил резания и остаточных напряжений.

К деталям авиационных двигателей предъявляются высокие требования точности. Обеспечить заданные требования в процессе изготовления становится затруднительным ввиду наложения остаточных напряжений на силы, действующие в технологической системе [4].

Анализ, перечисленных выше, проблем изготовления нежестких деталей позволил сделать вывод о необходимости прогнозирования появления брака и снижении технологических потерь при их производстве.

Целью работы является обеспечение требуемой точности изготовления деталей типа «диск» и прогнозирование возникновения технологических потерь еще на этапе технологической подготовки производства.

Задачей исследования была разработка методики определения величины прогиба полотна диска относительно обода от действия сил резания и одновременном воздействии остаточных напряжений.

### Методы и принципы исследования

К числу особенностей изготовления крыльчаток и дисков компрессоров авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) из титановых сплавов, можно отнести невозможность получения тонкостенных заготовок сложной формы методами литья. В результате этого заготовки изготавливают простой формы с большими припусками на механическую обработку, что обуславливает увеличение количества операций и переходов. Каждая операция и переход вносят свои напряжения в поверхностный слой детали или изделия и перераспределяют наследственные (то есть полученные на предыдущих обработках). К крыльчаткам и дискам компрессоров предъявляются высокие требования точности, например, точность обработки полотна диска по IT7 – IT6, биение наружных и торцевых поверхностей до 0,05 мм, шероховатость поверхностей Ra 1,25 – Ra 2,5 [5].

Размерная обработка таких деталей сопровождается силами резания достигающих высоких значений 1000 - 2000 Н, а остаточные напряжения достигают значений 200-400 МПа. Силы резания и остаточные напряжения в сочетании с низкой жесткостью лопаток крыльчаток и полотна дисков приводит к потере формы деталей, что затрудняет автоматизированную обработку, возникает необходимость в ручной слесарной обработке, а, следовательно, увеличивается трудоемкость и себестоимость обработки деталей. В приведенной ниже табл. 1 показаны соотношения допустимой погрешности и отклонения формы некоторых тонкостенных нежестких деталей при различных методах обработки [5].

По данным табл. 1 видно, что силы резания приводят к обратимым и необратимым изменениям формы деталей, таким как осевое смещение полотна диска, смещение пера лопатки крыльчатки относительно оси и другим. Указанные выше изменения формы увеличиваются при совместном действии сил резания и остаточных наследственных напряжений.

Таблица 1 - Допустимая погрешность и отклонения формы тонкостенных деталей ГТД

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.34.1>

Обрабатываемые элементы	Операции	Допустимая погрешность, мм	Наибольшие обратимые отклонения, мм	Встречающиеся остаточные отклонения, мм
Лопатка крыльчатки	Фрезерование	0,1	0,1 - 0,5	0,2 - 0,8
Перо лопатки	Шлифование профиля	0,5	0,1 - 0,6	0,3 - 0,6
Полотно диска	Торцевое точение	0,4 - 0,8	0,5 - 1,0	2,0 - 5,0

Именно на этапе технологической подготовки производства важно прогнозировать такие отклонения, имея лишь чертеж детали. С целью разработки методики определения возможных отклонений размеров и формы предлагается рассчитывать их через изгибающие моменты, вызываемые остаточными напряжениями относительно срединной поверхности [5], [6], [7]:

$$\sigma_x = 6M_x/h^2,$$

где  $\sigma_x$  – остаточное напряжение;

$h$  – толщина пластины;

$M_x$  – изгибающий момент

Изменение формы под действием сил в технологической системе, если прогиб не превышает размеров поперечного сечения, с достаточной точностью может быть описано в общем виде уравнением, которое имеет вид [4]:

$$q = D(d^4w/dx^2 + 2d^4w/(dx^2dy^2) + d^4w/dy^2);$$

где  $D$  – цилиндрическая жесткость пластины [8];

$w$  – искомый прогиб в любой точке пластины [9], [10];

$q$  – интенсивность внешней нагрузки, вызванной силами резания, силами закрепления, реакциями опорных элементов приспособлений.

Дальнейший расчет производится по методу Бубнова-Галеркина или другим подобным методом.

Например, можно использовать метод конечных элементов, который позволяет произвести численный расчет величины прогибов в каждой точке исследуемого диска. Однако, использование метода конечных элементов требует специальной трехмерной модели и последующее разбиение ее на множество конечных элементов. Расчет, согласно методу конечных элементов, требует больших вычислительных мощностей.

Ввиду того, что допускаемые погрешности составляют 0,1-0,8 мм, расчет величины деформации из-за действия силы резания можно производить при помощи уравнения:

$$w_1 = (w_0 E h^3 / (12 - (1 - m^2)) - r^2 M_{r0} y_{wr} - r^2 M_{q0} y_{wp} - P_y r^2 y_{wq}) / E h^3 / (12 - (1 - m^2));$$

где  $w_1$  – прогиб от действия силы резания;

$w_0$  – прогиб на внутреннем радиусе диска;

$M_{r0}$ ,  $M_{q0}$  – моменты, действующие на внутреннем радиусе в радиальном и тангенциальном направлениях, соответственно;

$r$  – текущий радиус, на котором рассчитывается прогиб;

$P_y$  – составляющая силы резания;

$Y_{wr}, Y_{wP}, Y_{wq}$  – сопровождающие функции [11];

$E$  – модуль упругости;

$m$  – коэффициент Пуассона;

$h$  – толщина диска.

Устойчивость диска снижается при воздействии сжимающих остаточных напряжений. Для учета остаточных напряжений была сделана замена этих напряжений на дополнительную осевую силу, приложенную к полотну диска.

Тогда прогиб вызванный действием остаточных напряжений будет рассчитываться следующим образом:

$$w_2 = 3Pr_n^2(1 - r_e^2/r_n^2)/20D;$$

где  $w_2$  – прогиб от действия остаточных напряжений;

$r_n$  – наружный радиус;

$r_e$  – внутренний радиус;

$P$  – заменяющая сила [8].

Таким образом, общий прогиб будет определяться следующим образом:

$$w = w_1 + w_2$$

Используя данный подход к определению величины прогиба полотна диска газотурбинного двигателя можно снизить количество технологических потерь еще на этапе подготовки производства.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили правомерность такого расчета. Погрешность между расчетными и экспериментальными данными составляет 6-12% (Рис. 1).

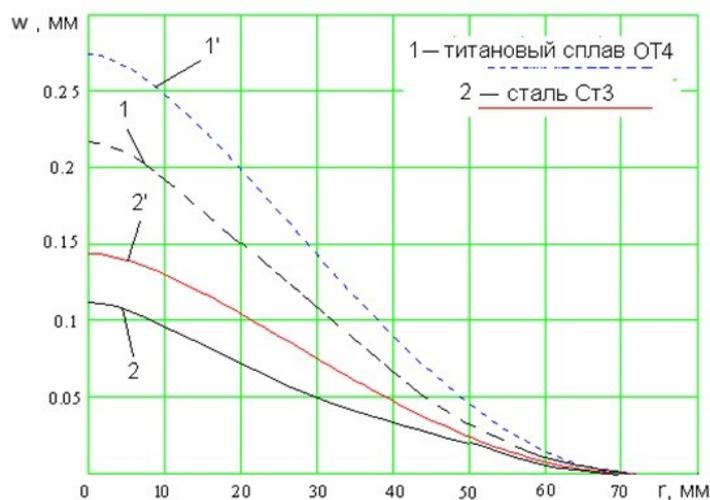


Рисунок 1 - Величины прогибов полотна диска при действии силы резания  $P_y = 20\text{Н}$  (1, 2) и при совместном действии силы резания  $P_y = 20\text{Н}$  и силы  $P = 10\text{Н}$ , действующей в радиальном направлении (1', 2')

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.34.2>

### Основные результаты

Исследованиями установлено, что при расчете величины погрешности обработки полотна нежесткого диска необходимо учитывать влияние остаточных технологических напряжений внесенных в поверхностный слой как с одной, так и с другой стороны полотна.

Методика расчета величины прогиба полотна нежесткого диска газотурбинного двигателя позволяет произвести оценку точности его изготовления. Зная величину прогиба можно проводить поднастройку технологического оборудования непосредственно в процессе обработки. Для этого требуется скорректировать управляющую программу станка (в случае обработки на станках с числовым программным управлением) с учетом возникающего прогиба.

Такой подход позволяет назначать режимы резания при механической обработке диска с учетом появления погрешности, что позволяет минимизировать величину этой погрешности.

### Обсуждение

Изложенные выше фрагменты методики теоретического определения изменения формы под действием сил и остаточных напряжений предусмотрено использовать для выбора и назначения технологических приемов снижения прогибов и обеспечения точности нежестких деталей.

На величину осевого смещения полотна дисков и пера лопатки крыльчатки под действием сил и остаточных напряжений можно повлиять путём симметричного удаления припуска с двух сторон полотна, в том числе, одновременно с обеих сторон, удаления припуска с полотна после обработки других элементов, точения полотна от ступицы к ободу, подбором оптимальных параметров инструмента, режимами и схемами обработки, схемами крепления детали и другими способами. В отдельных случаях при обработке особо нежестких сложнофасонных элементов детали типа лопаток крыльчаток в качестве опоры детали могут быть применены твердеющие материалы

(сплавы, неметаллы), после заливки которых в форму вместе с деталью обеспечивается контакт обрабатываемой поверхности детали с поддерживающим элементом на значительной площади.

Рассчитать величину силы обработки и ожидаемый прогиб полотна диска можно используя методики описанные в работах [13], [14].

### Заключение

Проведенные исследования показали, что необходимо учитывать совместное действие сил резания и остаточных технологических напряжений при оценке точности изготовления нежестких дисков. В проведенных ранее исследованиях оценивались деформации нежестких элементов деталей от действия сил резания без учета остаточных напряжений [13], [14]. Оценка действия остаточных напряжений производилась без учета сил в технологической системе [15].

Разработанная методика прогнозирования изменения размеров и формы нежестких деталей газотурбинных двигателей позволяет обоснованно выбрать технологические приемы обеспечения заданной точности и уменьшить себестоимость их обработки.

Исследования показали, что формирование погрешности обработки нежестких деталей происходит вследствие действия остаточных технологических напряжений, внесенных в поверхностный слой в процессе обработки и сформированных при изготовлении заготовки. При этом действие перечисленных выше факторов может влиять на погрешность обработки как в отдельности, так и при совместном их действии, причем при совместном действии величина погрешности может увеличиваться.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Скубачевский Г.С. Авиационные газотурбинные двигатели: конструкция и расчет / Г.С. Скубачевский. — М.: Машиностроение, 1981. — 550 с.
2. Когаев В.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность / В.П. Когаев, Н.А. Махутов [и др.] — М.: Машиностроение, 1985. — 224 с.
3. Кушнер В.С. Термомеханическая теория процесса непрерывного резания пластичных материалов / В.С. Кушнер. — Иркутск: Изд-во Иркутского университета, 1982. — 180 с.
4. Нестеренко Г. А. К вопросу обеспечения размерной точности при изготовлении дисков компрессоров / Г. А. Нестеренко // Международный научно-исследовательский журнал. — 2024. — № 1(139). — DOI 10.23670/IRJ.2024.139.160.
5. Вивденко Ю.Н. Обеспечение геометрической точности механической обработки тонкостенных элементов деталей ГТД. / Ю.Н. Вивденко // Вопросы авиационной науки и техники, серия «Технология авиационного двигателестроения». — М.: НИИД, 1992. — С. 32-37.
6. Авдонин А.С. Прикладные методы расчета оболочек и тонкостенных конструкций / А.С. Авдонин. — М.: Машиностроение, 1969. — 402 с.
7. Букатый С.А. Прогнозирование технологических остаточных деформаций тонкостенных дисков после упрочнения методом поверхностного пластического деформирования / С.А. Букатый, А.П. Кондратов, А.С. Букатый // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. — 2006. — № 2-2 (10). — С. 91-95.
8. Нестеренко Г.А. Расчет прогиба полотна диска осевой газоперекачивающей машины / Г.А. Нестеренко, И.С. Нестеренко, А.А. Орлов // Вестник машиностроения. — 2022. — № 11. — С. 64–65. — DOI: 10.36652/0042-4633-2022-11-64-65.
9. Nesterenko G.A. Calculation-experimental Method of Determining the Propensity for Warping Non-rigid Disks of Hydraulic Machine / G.A. Nesterenko, I.S. Nesterenko // Procedia Engineering: "Proceedings of the 3rd International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines, DVM 2016". — 2017. — P. 278-283.
10. Nesterenko G.A. Influence of Machining Parameters on the Precision of an Axial Compressor Disk / G.A. Nesterenko, I.S. Nesterenko // Russian Engineering Research. — 2023. — Vol. 43. — № 8. — P. 955–957. — DOI: 10.3103/S1068798X23080191
11. Нестеренко Г.А. Влияние технологических параметров обработки на точность изготовления диска осевого компрессора / Г.А. Нестеренко, И.С. Нестеренко // Вестник машиностроения. — 2023. — № 6. — С. 492-494. — DOI: 10.36652/0042-4633-2023-102-6-492-494.
12. Подгорный А.Н. Основы и методы прикладной теории упругости / А.Н. Подгорный, Г.А. Марченко, В.И. Пустынников и др. — Киев: Вища школа, 1981. — 328 с.
13. Nesterenko G.A. Accuracy Forecasting Disks Manufacturing of Axial Power Machines Considering the Forces at the Industrial Process System / G.A. Nesterenko, I.S. Nesterenko, E.A. Lysenko // Oil and Gas Engineering (OGE-2016) Omsk

State Technical University, Russian Federation, 25-30 April 2016 (Supported by PJSC Gazprom Neft). — 2016. — P. 487-492. — DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.630.

14. Биргер И.А. Расчёт на прочность деталей машин / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр [и др]. — М.: Машиностроение, 1993. — 640 с.

15. Зеньков Е.В. Анализ деформирования лабораторных образцов пластинчатого типа при сложном напряженном состоянии / Е.В. Зеньков // Международный научно-исследовательский журнал. — 2023. — №1 (127). — URL: <https://research-journal.org/archive/1-127-2023-january/10.23670/IRJ.2023.127.103> (дата обращения: 02.02.2024). — DOI: 10.23670/IRJ.2023.127.103

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Skubachevsky G.S. Aviacionnye gazoturbinnye dvigateli: konstrukciya i raschet [Aviation Gas Turbine Engines: Design and Calculations] / G.S. Skubachevskij. — М.: Mashinostroenie, 1981. — 550 p. [in Russian]

2. Kogaev V.P. Raschety detalej mashin i konstrukcij na prochnost' i dolgovechnost' [Calculations of Machine Parts and Structures for Strength and Durability] / V.P. Kogaev, N.A. Makhutov [et al.]. — М.: Mashinostroenie, 1985. — 224 p. [in Russian]

3. Kushner V.S. Termomekhanicheskaya teoriya processa nepreryvnogo rezaniya plastichnyh materialov [Thermomechanical Theory of the Process of Continuous Cutting of Plastic Materials] / V.S. Kushner. — Irkutsk: Publishing house of Irkutsk University, 1982. — 180 p. [in Russian]

4. Nesterenko, G. A. K voprosu obespecheniya razmernoj tochnosti pri izgotovlenii diskov kompressorov [On the Issue of Ensuring Dimensional Accuracy in the Manufacture of Compressor Discs] / G.A. Nesterenko // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Scientific Research Journal]. — 2024. — № 1(139). — DOI 10.23670/IRJ.2024.139.160. [in Russian]

5. Vivdenko Yu.N. Obespechenie geometricheskoy tochnosti mekhanicheskoy obrabotki tonkostennyh elementov detalej GTD [Ensuring Geometric Accuracy of Mechanical Processing of Thin-walled Elements of Gas Turbine Engine Parts] / Yu.N. Vivdenko // Voprosy aviacionnoj nauki i tekhniki, seriya «Tekhnologiya aviacionnogo dvigatelestroeniya» [Issues of Aviation Science and Technology, Series "Aircraft Engine Technology"]. — М.: NIID, 1992. — P. 32-37. [in Russian]

6. Avdonin A.S. Prikladnye metody rascheta obolochek i tonkostennyh konstrukcij [Applied Methods for Calculating Shells and Thin-walled Structures]. — М.: Mechanical Engineering, 1969. — 402 p. [in Russian]

7. Bukaty S.A. Prognozirovanie tekhnologicheskikh ostatochnyh deformacij tonkostennyh diskov posle uprochneniya metodom poverhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya [Prediction of Technological Residual Deformations of Thin-walled Disks after Hardening by Surface Plastic Deformation] / S.A. Bukaty, A.P. Kondratov, A.S. Bukaty. // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Korolyova [Bulletin of Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov]. — 2006. — № 2-2 (10). — P. 91-95. [in Russian]

8. Nesterenko G.A. Raschet progiba polotna diska osevoj gazoperekachivayushchej mashiny [Calculation of the Deflection of the Disk Blade of an Axial Gas Pumping Machine] / G.A. Nesterenko, I.S. Nesterenko, A.A. Orlov // Vestnik mashinostroeniya [Bulletin of Mechanical Engineering]. — 2022. — № 11. — P. 64–65. — DOI: 10.36652/0042-4633-2022-11-64-65. [in Russian]

9. Nesterenko G.A. Calculation-experimental Method of Determining the Propensity for Warping Non-rigid Disks of Hydraulic Machine / G.A. Nesterenko, I.S. Nesterenko // Procedia Engineering: "Proceedings of the 3rd International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines, DVM 2016". — 2017. — P. 278-283.

10. Nesterenko G.A. Influence of Machining Parameters on the Precision of an Axial Compressor Disk / G.A. Nesterenko, I.S. Nesterenko // Russian Engineering Research. — 2023. — Vol. 43. — № 8. — P. 955–957. — DOI: 10.3103/S1068798X23080191

11. Nesterenko G.A. Vliyanie tekhnologicheskikh parametrov obrabotki na tochnost' izgotovleniya diska osevoogo kompressora [The Influence of Technological Processing Parameters on the Accuracy of Manufacturing the Disk of an Axial Compressor] / G.A. Nesterenko, I.S. Nesterenko // Vestnik mashinostroeniya [Bulletin of Mechanical Engineering]. — 2023. — № 6. — P. 492-494. — DOI: 10.36652/0042-4633-2023-102-6-492-494. [in Russian]

12. Podgorny A.N. Osnovy i metody prikladnoj teorii uprugosti [Fundamentals and Methods of the Applied Theory of Elasticity] / A.N. Podgorny, G.A. Marchenko, V.I. Pustynnikov et al. — Kyiv: Vishcha shkola, 1981. — 328 p. [in Russian]

13. Nesterenko G.A. Accuracy Forecasting Disks Manufacturing of Axial Power Machines Considering the Forces at the Industrial Process System / G.A. Nesterenko, I.S. Nesterenko, E.A. Lysenko // Oil and Gas Engineering (OGE-2016) Omsk State Technical University, Russian Federation, 25-30 April 2016 (Supported by PJSC Gazprom Neft). — 2016. — P. 487-492. — DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.630.

14. Birger I.A. Raschyot na prochnost' detalej mashin [Calculation of the Strength of Machine Parts] / I.A. Birger, B.F. Shorr et al. — М.: Mashinostroenie, 1993. — 640 p. [in Russian]

15. Zenkov E.V. Analiz deformirovaniya laboratornyh obrazcov plastinchatogo tipa pri slozhnom napryazhenom sostoyanii [Analysis of Deformation of Laboratory Samples of Lamellar Type under Complex Stress State] / E.V. Zenkov // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Scientific Research Journal]. — 2023. — №1 (127). — URL: <https://research-journal.org/archive/1-127-2023-january/10.23670/IRJ.2023.127.103> (accessed: 02.02.2024). — DOI: 10.23670/IRJ.2023.127.103 [in Russian]