

Применение механики пластин для оценки эффективности упрочняющей дробеструйной обработки

Г.Л. Колмогоров, А.С. Высотин*

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Российская Федерация, 614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29

*Автор, ответственный за переписку

(поступила в редакцию: 24 апреля 2018 г.; доработана: 14 сентября 2018 г.; принята к публикации: 11 октября 2018 г.)

Введение. В работе рассмотрена современная ситуация в области поверхностного пластического деформирования, а именно упрочнение деталей машиностроения дробеструйной обработкой. Поскольку современное машиностроение использует улучшенные технологические способы и методы преобразования материала деталей в состояние, отвечающее нормам эксплуатации изделий, в отечественной и зарубежной литературе предлагается множество способов оценки влияния эксплуатационных условий на ресурс детали. Однако фундаментальная основополагающая теория этой области еще не создана.

В статье описана сущность процесса поверхностного пластического деформирования. Рассмотрены виды и преимущества дробеструйной обработки. У многих читателей может возникнуть вопрос: возможно ли, сняв слой коррозии, укрепить поверхностный слой обрабатываемой детали? Метод дробеструйной обработки хорошо справляется с разноплановыми задачами, позволяя обрабатывать детали сложной геометрии, а также детали с труднодоступными местами. Качество обработки позволяет наносить на поверхность детали любое покрытие без дополнительной подготовки и обезжиривания.

Цели. Одной из проблем является сложность определения уровня остаточных напряжений, формируемых в процессе дробеструйной обработки. Значимость проблемы заключается в том, что в настоящее время нет точной методики определения остаточных напряжений после дробеструйного упрочнения. Цель данного исследования – оценить эффективность дробеструйного упрочнения, т.е. определить уровень остаточных напряжений, формируемых в процессе дробеструйной обработки. Задача состоит в том, чтобы вычислить остаточные напряжения при дробеструйной обработке путем измерения деформации контрольной пластины (образца-свидетеля), полученной при одностороннем наклепе в течение определенного периода времени.

Методы. После обработки определяется стрела прогиба контрольной пластины. По стреле прогиба вычисляются остаточные напряжения в пластине. Для этого используют метод Н.Н. Давиденкова, согласно которому из контрольной пластины вырезают полоску и травлением производят последовательное снятие слоев. При снятии слоев полоска меняет геометрию за счет изменения напряженного состояния, что позволяет с использованием соответствующих соотношений установить распределение остаточных напряжений пластины.

Задачей предлагаемой методики является упрощение способа, снижение трудоемкости вычисления распределения остаточных напряжений по толщине контрольной пластинки, повышение точности определения остаточных напряжений при дробеструйном упрочнении.

Выводы. На основании положений механики пластин рассмотрено деформированное состояние контрольной пластины при дробеструйной обработке. В итоге получена аналитическая зависимость, позволяющая оценить остаточные напряжения в контрольной пластине после дробеструйной обработки.

Ключевые слова: дробеструйная обработка, поверхностное пластическое деформирование, остаточные напряжения, шероховатость, предел выносливости, прогиб, усталость, механика пластин, контрольная пластина

Введение

Одна из актуальных проблем промышленного производства на сегодняшний день – повышение прочности деталей и конструкций, которые активно подвергаются износу. Один из эффектив-

ных способов решения такой проблемы – упрочнение методами поверхностного пластического деформирования.

В настоящее время разработано и нашло широкое применение в авиационном двигателестроении достаточное количество различных методов

поверхностного пластического деформирования, обеспечивающих упрочнение практически всей номенклатуры деталей двигателей [1–3]. Научные методы и подходы по оценке эффективности упрочняющей обработки, а также по оценке долговечности деталей и конструкций часто совершенствуются. Одной из главных задач современного машиностроения является повышение ресурса используемых деталей. Однако методы оценки напряженно-деформированного состояния дают лишь общее представление об области начала разрушения. Уже не раз научно доказано, что после упрочнения методом поверхностного пластического деформирования в поверхностном слое образуются остаточные напряжения, которые являются причиной появления сопротивления усталости деталей [4]. Из этого следует, что появление растягивающих напряжений в процессе эксплуатации детали чаще всего может привести к тому, что понижается предел выносливости детали, и, соответственно, к ее разрушению.

В ходе обзора отечественной и зарубежной литературы выявлено, что большинство работ посвящается анализу разрушения деталей. Во многих работах представлены различные способы оценки влияния эксплуатационных условий на ресурс детали, также предлагаются методы по определению зон развития усталостных трещин [5–7].

Поверхностное пластическое деформирование – это направление технологии увеличения сопротивления усталости деталей, активно используемое в различных сферах авиации и машиностроения.

Существует несколько способов обработки поверхностным пластическим деформированием:

1. Дробеструйный метод, при котором в качестве рабочих тел используют стальные шары или дробь, а источник кинетической энергии – струя сжатого воздуха.

2. Дробеметный метод, при котором в качестве рабочих тел используют стальные шары или дробь, источником кинетической энергии служит вращение ротора дробемета.

3. Пневмогидродробеструйный метод, при котором в качестве рабочих тел используют стальные шары и дробь, источником кинетической энергии является струя газа с жидкостью.

4. Гидродробеструйный метод, при котором в качестве рабочих тел используют стальные шары или дробь, источник кинетической энергии – струя жидкости [8].

Из всех способов обработки поверхностным пластическим деформированием наиболее эффективным считается дробеструйный метод. Это один из самых распространенных методов поверхност-

ного пластического деформирования, применяемых для повышения сопротивления усталости деталей, работающих в условиях циклического нагружения.

Также это простой и высокопроизводительный способ, позволяющий сократить цикл ремонта, понизить себестоимость, увеличить межремонтный ресурс. Иными словами, дробеструйное упрочнение – это технологический прием механической обработки, который получил широкое применение в авиастроении благодаря простоте использования и эффективности полученных результатов.

Основные преимущества обработки деталей дробью:

- однородность обработки деталей;
- повышение предела усталости обрабатываемого материала;
- обеспечение требуемого качества поверхности;
- возможность обработки изделий сложной геометрии.

Дробеструйная обработка обеспечивает повышение прочностных характеристик деталей за счет формирования благоприятных остаточных напряжений. Она помогает сократить большое количество трещин и истонченных участков на поверхности деталей, которые испытывают повышенные рабочие нагрузки. Подобные результаты достигаются благодаря тому, что в процессе воздействия дроби на обрабатываемую поверхность совершаются интенсивные множественные удары дроби по поверхности материала детали. Отсюда возникновение остаточных напряжений сжатия на внешнем слое обрабатываемой детали. Затем происходит уравнивание напряжения на растяжение, которое испытывает деталь при эксплуатации. В связи с этим необходимо оценить влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости деталей.

К недостаткам способа следует отнести сложность реализации способа замера остаточных напряжений при дробеструйном упрочнении деталей, трудоемкость и низкую точность определения остаточных напряжений. Кроме того, при стравливании слоев материала детали происходит перераспределение остаточных напряжений, что также снижает точность их определения.

На первый взгляд кажется, что исследователи с легкостью добиваются повышения выносливости ответственных деталей. Однако следует учесть, что существует множество эмпирических методик назначения режимов дробеструйной обработки. Недостатком их всех является то, что каждая из них ограничена условиями эксперимента, при котором она создана. Если меняются условия эксперимента, то сразу появляется необходимость повторять

эксперимент для создания новых методик [9]. Именно поэтому активно предпринимаются попытки разработки и внедрения определенной методики, позволяющей минимизировать экспериментальные исследования, которые основаны на обработке образцов с целью отладки процесса или оптимизации режимов дробеструйной обработки.

Цели

Главная проблема назначения режимов дробеструйной обработки – это отсутствие зависимостей, определяющих энергию, которую поглощает материал в процессе обработки. Пример эмпирического решения этой проблемы – метод Almen strips, названный в честь его создателя [10]. Методом Almen strips пользуются многие современные предприятия. Его используют для замера и контроля процесса дробеструйного упрочнения и наклепа. На сегодняшний день метод Almen strips – один из основных и общепринятых процессов измерения для контрольного замера интенсивности упрочнения поверхности после обработки дробью. Метод предоставляет достоверную картину упрочнения и наклепа поверхностного слоя, что в свою очередь позволяет привести процесс обработки поверхности дробью в соответствие с заданными характеристиками необходимой величины упрочнения [11].

Целью данного исследования является оценка эффективности дробеструйного упрочнения, т.е. определение уровня остаточных напряжений, формируемых в процессе дробеструйной обработки. Задача состоит в том, чтобы определить остаточные напряжения при дробеструйной обработке путем измерения деформации контрольной пластины (образца-свидетеля), полученной при одностороннем наклепе в течение конкретного периода времени. После обработки вычисляют стрелу прогиба контрольной пластины. По стреле прогиба устанавливают остаточные напряжения в пластине. Для этого используют метод Н.Н. Давиденкова [12], согласно которому из контрольной пластины вырезают полоску и травлением производят последовательное снятие слоев. При снятии слоев полоска меняет геометрию за счет изменения напряженного состояния, что позволяет с использованием соответствующих соотношений определить распределение остаточных напряжений пластины.

Задачей предлагаемой методики является упрощение способа, снижение трудоемкости выявления распределения остаточных напряжений по толщине контрольной пластинки, повышение точности определения остаточных напряжений при дробеструйном упрочнении.

Методы

В предлагаемой методике на основании положений механики пластин получено аналитическое выражение связи прогиба контрольной пластины с действующими остаточными напряжениями после дробеструйной обработки.

Дифференциальное уравнение изгиба контрольной пластины определяется дифференциальным уравнением изгиба прямоугольной пластины [13]

$$\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} = \frac{p}{D}, \quad (1)$$

где $\omega(x, y)$ – функция прогиба; p – поперечная нагрузка; $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ – цилиндрическая жесткость контрольной пластины; E – модуль упругости материала контрольной пластины; μ – коэффициент Пуассона материала пластины; h – толщина контрольной пластины.

В случае прогиба пластины остаточными напряжениями после дробеструйной обработки в уравнении (1) $p = 0$ и уравнение принимает вид

$$\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} = 0. \quad (2)$$

Контрольная пластина в процессе дробеструйной обработки свободно опирается по контуру, при этом функция прогибов, формирующихся в процессе дробеструйной обработки, имеет вид [6]

$$\omega(x, y) = \omega_0 \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b}, \quad (3)$$

где a, b – размеры контрольной пластины в плане; ω_0 – стрела прогиба, соответствующая прогибу центральной части пластины.

Функция (3) соответствует упругому деформированному состоянию от остаточных напряжений, сформированных в процессе дробеструйной обработки.

При изгибе в сечениях контрольной пластины действуют изгибающие моменты [6]

$$\begin{aligned} M_x &= -D \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right), \\ M_y &= -D \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

В экспериментах по дробеструйной обработке обычно применяют квадратные пластины ($a = b$), поэтому соотношения (4) будут идентичны

$$\begin{aligned} M_x = M_y &= -D \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) = \\ &= -D \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

или после подстановки соотношения (3) при $x = \frac{a}{2}, y = \frac{b}{2}$ для квадратной пластины получим

$$M_x = M_y = \omega_0 \pi^2 D \frac{1}{a^2} (1 + \mu). \quad (6)$$

При изгибе пластины от остаточных напряжений

$$\sigma_x^{\max} = \frac{6M_x}{h^2}, \sigma_y^{\max} = \frac{6M_y}{h^2}. \quad (7)$$

Из выражений (6) и (7) получим значения максимальных остаточных напряжений в контрольной пластине, соответствующих центру контрольной пластины

$$\sigma_x^{\text{осм}} = \sigma_y^{\text{осм}} = \frac{1}{2} \omega_0 \frac{Eh}{1-\mu^2} \cdot \frac{\pi^2}{a^2}. \quad (8)$$

Выводы

На основании положений механики пластин предложена методика определения остаточных напряжений, формируемых в процессе дробеструйной обработки контрольной пластины. При известном значении стрелы прогиба ω_0 с помощью соотношения (8) определяются остаточные напряжения σ_x^{\max} и σ_y^{\max} в центре контрольной пластины, что позволяет выбрать технологические параметры дробеструйной обработки. Это имеет важное значение для повышения усталости деталей машиностроения, развития и преобразования методов анализа конструкций машиностроения в условия воздействия технологических факторов и различных эксплуатационных нагрузок.

Также можно сделать вывод, что наибольшее значение при повышении эффективности ремонта деталей авиационных двигателей имеет увеличение послеремонтного ресурса деталей за счет упрочняющей обработки.

В результате проведенного исследования мы можем сделать вывод, что, несмотря на многолетнюю практику изучения процесса поверхностного пластического деформирования дробеструйной обработкой, в этой области не сформирована фундаментальная теоретическая база. Поэтому отсутствует определенная методика оптимального выбора метода упрочняющей обработки для получения требуемой шероховатости поверхностного слоя и усталостной прочности деталей машиностроения.

© Колмогоров Г.Л., Высотин А.С., 2018



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Список литературы

1. Кузнецов Н.Д., Цейтлин В.И., Волков В.И. Технологические методы повышения надежности деталей машин: справочник. М.: Машиностроение, 1993. 304 с.
2. Курпичев В.А., Букатый А.С., Чирков А.В. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочненных гладких деталей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2012. № 3 (23). С. 102–109.
3. Евстигнеев М.И., Подзей А.В., Сулима А.М. Технология производства двигателей летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1982. 263 с.
4. Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. 1986. № 8. С. 29–32.
5. Kanwar J.S.G., Pali R., Subhash C., Bharaj R.S. Durability analysis of lightweight crankshafts design. Using geometrically restricted finite element simulation techniques for camless engines // International Conference of Advance Research and Innovation (ICARI-2014). 2014. Pp. 56–68.
6. Ma Xingguo, You Xiaomei, Wen Bangchun. Multy-body dynamics simulation on flexible crankshaft system // 12th IFToMM World Congress, 2007, June 18–21, Besancon, France.
7. Махалов М.С. Расчетные модели остаточных напряжений поверхностного слоя после упрочнения способами поверхностного пластического деформирования // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2012. № 3. С. 110–115.
8. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.
9. Рыбаков Г.М. Фундаментальные основы управления качеством дробеструйной обработки деталей машиностроения. Сообщение 3. Разработка «предсказывающей функции» // Известия вузов. Машиностроение. 2006. № 3. С. 47–52.
10. Almen J.O. Peening surfaces improve endurance of machine parts // Metal Progress. 1943. No 2. Pp. 209–217.
11. Пластины Альмена. Оборудование для антикоррозионных работ. URL: <http://blastservis.ru/kat/kabiny-drobestruiyue/kabiny-naklep-i-uprochnenie/almen-strips> (дата обращения: 20.10.2018).
12. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: МАШГИЗ, 1963. 232 с.
13. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластины и оболочки. М.: Наука, 1966. 635 с.

Об авторах

Колмогоров Герман Леонидович – доктор технических наук, профессор кафедры динамики и прочности машин, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, Россия). Является автором более 200 публикаций. eLIBRARY SPIN-код: 8482-2065. *Область научных интересов:* обработка металлов давлением, теория пластин и оболочек.

чек, статическая и динамическая устойчивость конструкций, механика деформируемого твердого тела. *Контактная информация*: e-mail – dpm@pstu.ru

Высотин Александр Сергеевич – аспирант кафедры динамики и прочности машин, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, Россия). Автор трех публикаций. *Область научных интересов*: обработка металлов давлением, теория пластин и оболочек, статическая и динамическая устойчивость

конструкций, механика деформируемого твердого тела. *Контактная информация*: e-mail – dpm@pstu.ru

Для цитирования

Колмогоров Г.Л., Высотин А.С. Применение механики пластин для оценки эффективности упрочняющей дробеструйной обработки // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2018. Т. 14. № 6. С. 475–480. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-6-475-480

RESEARCH PAPER

Application of plate mechanics to evaluate the effectiveness of reinforcing shot blasting

German L. Kolmogorov, Alexandr S. Vysotin*

Perm National Research Polytechnic University
29 Komsomolsky prospect, Perm, 614000, Russian Federation

*Corresponding author

(received: April 24, 2018; revised: September 14, 2018; accepted: October 11, 2018)

Abstract. Introduction. The paper considers the current state in the field of surface plastic deformation, namely the hardening of machine-building parts by shot blasting. Since modern engineering uses improved technological methods and methods for transforming material parts into a state that meets the standards for the operation of products, in the domestic and foreign literature there are many ways to assess the impact of operating conditions on the part life. However, the fundamental underlying theory of this field has not yet been created. The article describes the essence of the process of surface plastic deformation. The types and advantages of shot blasting are also considered. Many readers may wonder: is it possible, after removing the corrosion layer, to strengthen the surface layer of the workpiece? The method of shot blasting copes well with these diverse tasks, allowing to handle parts of complex geometry, as well as parts with hard-to-reach places. The quality of processing allows to apply any coating to the surface of a part without additional preparation and degreasing.

Aims. One of the problems is the difficulty of determining the level of residual stresses generated in the process of shot blasting. The significance of the problem lies in the fact that at present there is no exact method for determining residual stresses after shot peening. The purpose of this study is to evaluate the effectiveness of shot peening, i.e. determination of the level of residual stresses generated in the process of shot blasting. The task is to determine the residual stresses during shot blasting by measuring the deformation of the control plate (witness sample) obtained by one-sided bead over a certain period of time.

Methods. After processing, the deflection of the control plate is determined. According to the deflection arrow, the residual stresses in the plate are determined. To do this, the N.N. Davidenkov's method is used, according to which a strip is cut out from the control plate and the layers are removed by etching. When removing the layers, the strip changes the geometry due to a change in the stress state, which makes it possible to determine the distribution of the residual stresses of the plate using the appropriate ratios. The objective of the proposed technique is to simplify the method, reducing the complexity of determining the distribution of residual stresses across the thickness of the control plate, improving the accuracy of determining the residual stresses during shot peening.

Conclusions. Thus, based on the positions of the mechanics of plates, the deformed state of the control plate during shot blasting was considered. Finally, an analytical dependence was obtained, allowing estimating the residual stresses in the control plate after shot blasting.

Keywords: shot blasting, surface-plastic deformation, residual stress, roughness, limit of endurance, sag, fatigue, mechanics of plates, control plate

References

1. Kuznetsov N.D., Tseytlin V.I., Volkov V.I. (1993). *Tekhnologicheskie metody povysheniya nadyozhnosti detalej mashin [Technological methods to improve the reliability of machine parts]*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 304. (In Russ.)

2. Kirpichev V.A., Bukatyy A.S., Chirkov A.V. (2012). Prediction of fatigue resistance of surface-hardened smooth parts. *News of higher educational institutions. Povolzhskiy region. Technical Science*, 3(23), 102–109. (In Russ.)

3. Evstigneev M.I., Podzey A.V., Sulima A.M. (1982). *Tekhnologiya proizvodstva dvigatelej letatel'nykh apparatov*

[*Production technology of aircraft engines*]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 263. (In Russ.)

4. Pavlov V.F. (1986). On the relationship between residual stresses and the limit of endurance in bending under conditions of stress concentration. *University news. Engineering*, (8), 29–32. (In Russ.)

5. Kanwar J.S. Gill, Pali Rosha, Subhash Chander, Bharaj R.S. (2014). Durability analysis of lightweight crankshafts design. Using geometrically restricted finite element simulation techniques for camless engines. *International Conference of Advance Research and Innovation (ICARI-2014)*, 56–68.

6. Ma Xingguo, You Xiaomei, Wen Bangchun. (2007). Multy-body dynamics simulation on flexible crankshaft system. *12th IFToMM World Congress*. June 18–21, Besancon, France.

7. Makhalov M.S. (2012). Computational models of residual stresses of the surface layer after hardening by means of surface plastic deformation. *Metal processing (technology, equipment, tools)*, (3), 110–115. (In Russ.)

8. Sulima A.M., Shulov V.A., Yagodkin Yu.D. (1988). *Poverhnochnyj sloj i ekspluatatsionnye svoystva detalej mashin [Surface layer and operational properties of machine parts]*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 240. (In Russ.)

9. Rybakov G.M. (2006). Fundamental principles of quality control of shot blasting machining parts. Report 3. Developing a “predictive function”. *University news. Engineering*, (3), 47–52. (In Russ.)

10. Almen J.O. (1943). Peening surfaces improve endurance of machine parts. *Metal Progress*, (2), 209–217.

11. Oborudovanie dlya antikorrozionnyh rabot. (October 20, 2018). *Plastiny Al'mena [Almen Strips]*. Avail-

able from <http://blastservis.ru/kat/kabiny-drobestruynye/kabiny-naklep-i-uprochnenie/almen-strips> (In Russ.)

12. Birger I.A. (1963). *Ostatochnye napryazheniya [Residual stress]*. Moscow, MASHGIZ Publ., 232. (In Russ.)

13. Timoshenko S.P., Voinovski-Krieger C. (1966). *Plastinki i obolochki [Plates and shells]*. Moscow, Nauka Publ., 635. (In Russ.)

About the authors

German L. Kolmogorov – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Dynamics and Strength of Machine Department, Perm National Research Polytechnic University (Perm, Russia). He is the author more than 200 publications. eLIBRARY SPIN-code: 8482-2065. *Research interests*: processing of metals pressure, theory of plates and envelopes, static and dynamic stability of structures, mechanic of a deformable solid body. *Contacts*: e-mail – dpm@pstu.ru

Alexandr S. Vysotin – graduated from Perm National Research Polytechnic University in 2016. Graduate student of the Dynamics and Strength of Machine Department in Perm National Research Polytechnic University (Perm, Russia). He is the author of the 3 publications. *Research interests*: processing of metals pressure, theory of plates and envelopes, static and dynamic stability of structures, mechanic of a deformable solid body. *Contacts*: e-mail – dpm@pstu.ru

For citation

Kolmogorov G.L., Vysotin A.S. (2018). Application of plate mechanics to evaluate the effectiveness of reinforcing shot blasting. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 14(6), 475–480. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-6-475-480 (In Russ.)