

ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

629.735.015.4: 539.219.2

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПОВЫШЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ СЛОЖНО НАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДАМИ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Сообщение 1. Аккумуляция энергии материалом при поверхностном пластическом деформировании

Канд. техн. наук Г. М. РЫБАКОВ

Рассмотрен механизм аккумуляции энергии объемом материала при дробеструйной обработке деталей. Энергия аккумулируется в упруго растянутом объеме материала и расходуется на поддержание сжатия поверхностного слоя при переменных или постоянных напряжениях. Доказано существование максимума накопленной энергии, при котором сопротивление усталости достигает максимальных значений.

Energy storing mechanism in the volume of material under shot peening process is described. The energy being stored in the elastically tensile volume of material is expended for keeping compressed surface layer during constant and alternating tensions. Stored energy maximum with the fatigue strength is proved to occur.

Известно, что усталость металла — это процесс постепенного накопления повреждений материала под действием переменных напряжений, приводящий к изменению свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению (ГОСТ 23207-78 Сопротивление усталости). До настоящего времени не удалось описать процесс накопления повреждений однозначной функцией, связывающей величину переменного напряжения с характеристиками сопротивления усталости материала. Поэтому эти характеристики определяют, проводя усталостные испытания, подобно определению механических свойств материалов. Вместе с тем применение методов поверхностного пластического деформирования (ППД) повышает сопротивление усталости материала. Эффект повышения сопротивления усталости связывают с остаточными напряжениями (ОН) сжатия, возникающими в поверхностном слое деталей при ППД.

Определяют ОН в настоящее время известным методом Давиденкова. Их регламентируют по величине максимальных напряжений сжатия в поверхностном слое, глубине залегания сжимающих напряжений и величине максимальных подслояных растягивающих напряжений. Регламентируемые параметры ОН показаны на рис. 1. Таким образом, распределение ОН в поверхностном слое характеризуется несколькими параметрами. Поэтому приводимые в литературе «простые» эмпирические формулы, связывающие ОН с сопротивлением усталости, нельзя признать корректными. Одной из таких «простых» эмпирических формул является формула (1), приведенная в [1],

$$\sigma_{-1} = \sigma_{-1исх} - k\sigma_{ост}, \quad (1)$$

где σ_{-1} — текущий предел выносливости материала, зависящий от величины ОН; $\sigma_{-1исх}$ — предел выносливости материала в исходном состоянии (до ППД); $\sigma_{ост}$ — ОН, $k = (0,1 \dots 0,3)$ — эм-

пирический коэффициент. Если исходить из сложной структуры ОН (см. рис. 1), то становится непонятным, какое значение ОН следует подставлять в (1).

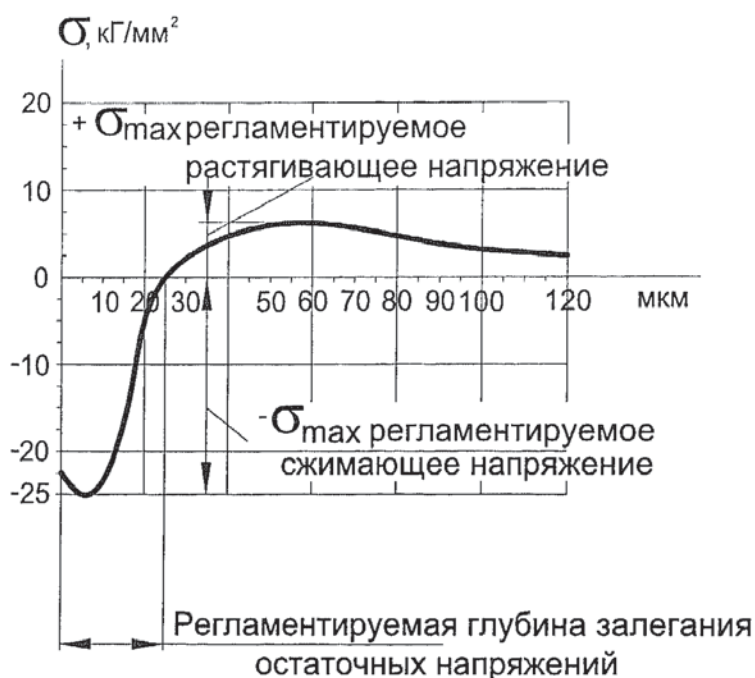


Рис. 1. Регламентируемые параметры распределения остаточных напряжений в поверхностном слое материала детали

Основная проблема, по которой подобные эмпирические формулы нельзя признать корректными, заключается в том, что зависимость, которая связывает ОН с повышением предела выносливости σ_{-1} до сих пор не установлена.

Сжимающие ОН представляют собой реакцию материала на возникновение остаточной деформации в поверхностном слое детали при ППД. Эти напряжения представляют собой часть общего напряженного состояния всего объема материала и являются показателем того, что в поверхностном слое наведена положительная остаточная деформация.

Известно, что остаточные напряжения, с точки зрения физики металлов, есть форма связанной потенциальной энергии, поглощенной (накопленной) металлом при деформировании [2]. Структура аккумуляции энергии материалом при пластической деформации, описанная в [2], представлена на рис. 2. Начиная с некоторой степени деформации, неоднородность деформированного состояния больших объемов поликристаллов уменьшается, вследствие чего уменьшается накопление потенциальной энергии, обуславливающей появление остаточных напряжений первого рода. Для исследуемых деталей эффективными, очевидно, будут являться условия упрочнения, при которых создаются степени деформации поверхностного слоя, обеспечивающие восходящий уровень накапливаемой энергии, как показано на рис. 2.

Из изложенного выше следует, что наиболее плодотворным направлением исследований закономерностей, связывающих ОН с сопротивлением усталости, является изучение процесса аккумуляции потенциальной энергии в объеме материала детали при ППД и изучение влияния ее величины на сопротивление усталости.

В качестве ППД для исследований был выбран широко применяемый в мире метод дробеструйной обработки (ДО). Известно, что под действием ДО пластина прямоугольной формы приобретает прогиб, т.е. выгибается навстречу потоку дроби [3]. В результате мно-

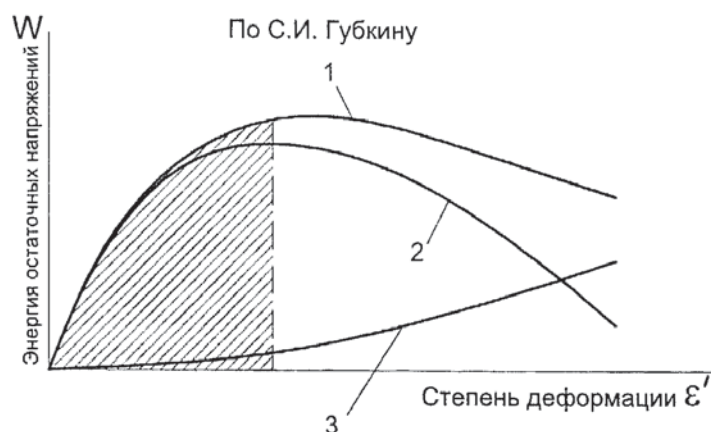


Рис. 2. Зависимость энергии остаточных напряжений от степени деформации: 1 — общая энергия; 2 — энергия остаточных напряжений 1-го рода; 3 — суммарная энергия остаточных напряжений 2-го и 3-го рода

голетних исследований нами был найден принципиально новый метод определения ОН в изогнутой ДО пластине. При известных характеристиках прочности материала ОН по всему сечению пластины определяются только по одному параметру — величине прогиба пластины, возникшего в процессе ДО [4]. В основу решения положена известная задача теории упругости — внецентренное растяжение или сжатие стержней прямоугольного сечения. Пластически и упруго деформированные слои представляются в виде стержней прямоугольного сечения, взаимодействующих друг с другом. В изогнутом после ДО состоянии слои действуют друг на друга с равными по модулю и противоположно направленными силами, приложенными со смещением (с эксцентриситетом) относительно центров симметрии каждого слоя. При этом условии система из двух слоев находится в равновесии. Разработанный метод, названный экспресс-методом (или алгоритм Рыбакова), дает возможность определять потенциальную энергию, накопленную материалом, по характеру распределения ОН по всему сечению пластины в зависимости от величины прогиба образца (пластины прямоугольной формы), измеренного на постоянной для всех измерений базе (базовом размере). Пример расчетного определения ОН по всему сечению образца толщиной 2 мм приведен на рис. 3, где позициями обозначены: 1 — максимальные напряжения сжатия на поверхности пластины, подвергнутой ДО; 2 — максимальные подслоиные растягивающие напряжения; 3 — сжимающие напряжения на вогнутой (не обработанной ДО) стороне пластин; 2 мм — толщина пластины; 0,194 мм — глубина пластически деформированного слоя; 0,162 мм — глубина залегания сжимающих напряжений. Прогиб образца, измеренный после ДО на базе 30 мм, равнялся 0,06 мм. Материал образца — жаропрочный сплав (модуль упругости $E = 200$ ГПа и предел текучести 740 МПа). Для того чтобы связать распределение ОН с накопленной энергией, был проведен большой объем исследований. Для расчета распределения напряжений по всему сечению образца (пластины) разработана программа для ЭВМ [5]. Пример действия программы представлен на рис. 4. Теоретические расчеты по программе [5] показали, что аккумулируемая энергия в процессе ДО проявляется как сумма энергии сжатия поверхностного слоя и энергии растяжения внутреннего объема, как показано на рис. 4. Сопоставление рис. 2 и рис. 4 показывает принципиальное совпадение распределения энергий и напряжений первого рода как для напряжений сжатия поверхностного слоя, так и для напряжений растяжения внутреннего, глубинного слоя. Для наглядности механизм аккумулирования энергии подробно рассмотрен на конкретном примере распределения ОН по сечению пластины, представленном на рис. 3.

Действия по определению аккумулированной энергии следующие. Приложим к эпюре на рис. 5 «выпрямляющий момент» с симметричным распределением напряжений. В полученной суперпозиции (наложении) напряжений равновесие не нарушится, а максимальные напряжения растяжения во внутреннем объеме материала снизятся, как показано на рис. 5, б.

Из полученного распределения напряжений следует, что максимальные подслоиные растягивающие напряжения обеспечили дополнительное сжатие поверхностного слоя при наложении «выпрямляющего момента». Следовательно, часть аккумулированной внутренним объемом материала энергии израсходована на сжатие поверхностного слоя. Чтобы сделать этот механизм более наглядным, рассмотрим взаимодействие пластически и упруго деформированных слоев в условиях равновесия, как показано на рис. 6. Как видно из рис. 6, при взаимодействии упруго и пластически деформированных слоев существует «граница текучести», по которой пластически деформированный слой взаимодействует с упруго деформированным слоем.

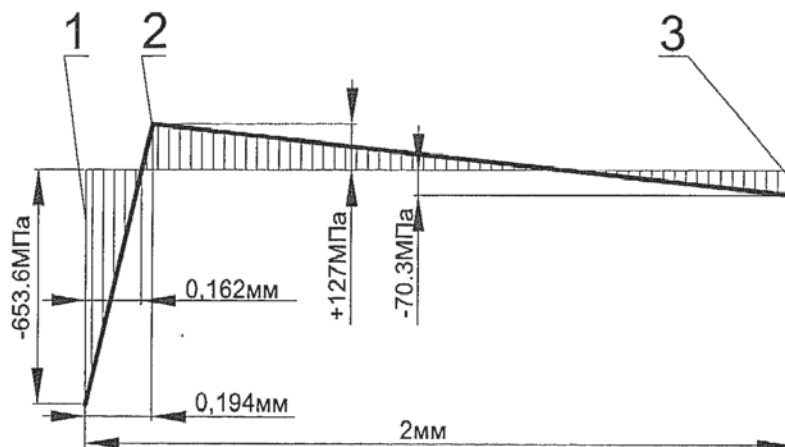


Рис. 3. Пример расчета распределения напряжений по всему сечению образца размером $70 \times 4 \times 2$ после ДО

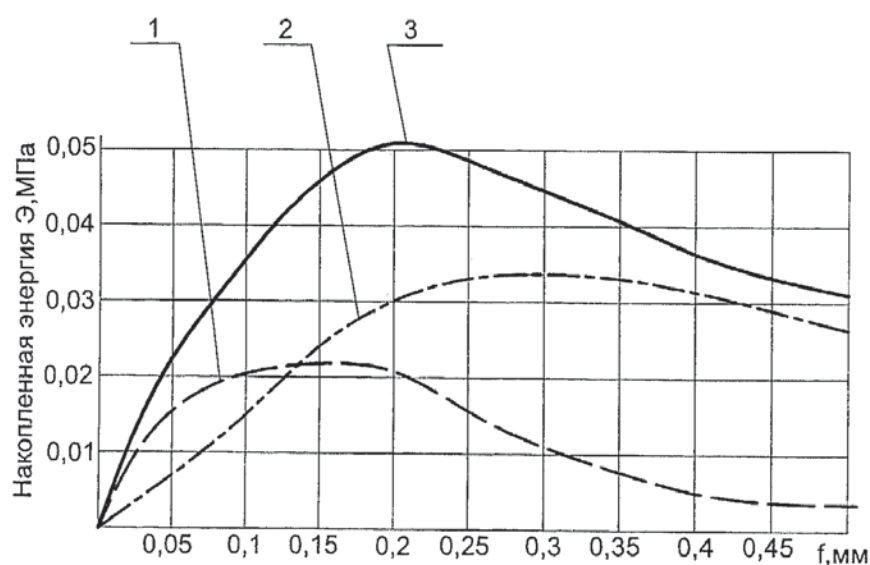


Рис. 4. Энергия, накопленная материалом под действием ДО: 1 — энергия сжатого поверхностного слоя; 2 — энергия растяжения упруго деформированного внутреннего объема материала; 3 — суммарная энергия, накопленная материалом

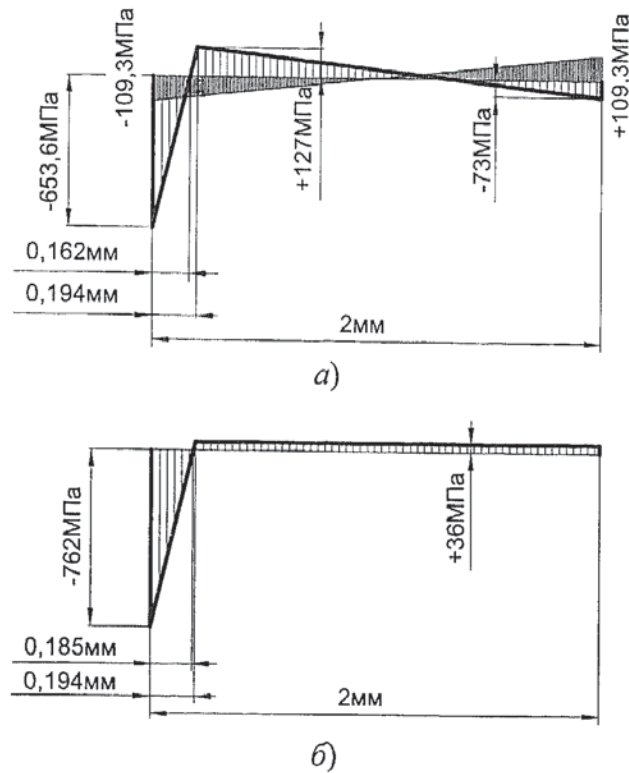


Рис. 5. Результат наложения «выпрямляющего момента» на эпюру изогнутого образца

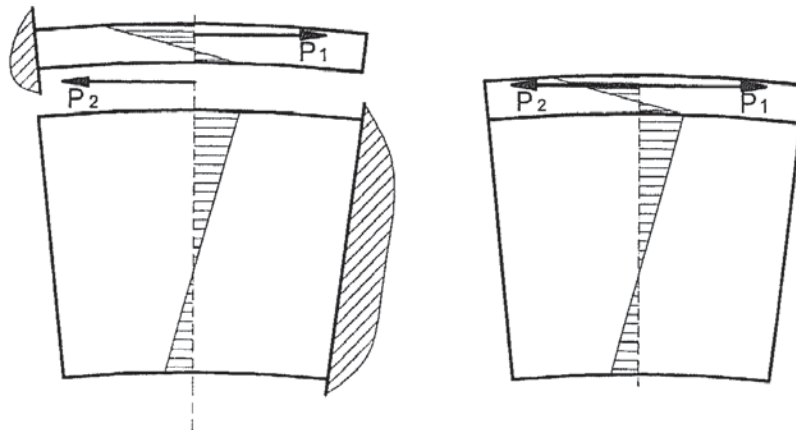


Рис. 6. Взаимодействие пластически и упруго деформированных слоев в условиях равновесия

При выпрямлении пластины на «границе текучести» у пластически деформированного слоя растягивающие напряжения возрастают, так как в этой области у данного слоя происходит растяжение материала, а у упруго деформированного слоя эти напряжения уменьшаются, потому что в этой области у данного слоя происходит сжатие материала. Взаимоисключающие деформации приводят к тому, что в этой области исходная деформация не меняется у обоих слоев при выпрямлении пластины. Чтобы образец выпрямился в этих условиях, пластически деформированный слой должен получить увеличенное (двойное) сжатие на обработанной ДО поверхности, а упруго деформированный — увеличенное (двойное) растяжение на необработанной ДО поверхности. В этом состоянии напряжения растяжения на границе упруго и пластически деформированных слоев сохранятся такими,

какими они были до выпрямления пластины, но равновесие системы при этом нарушается. Упруго деформированный слой растянут, но еще не разгружен и не сжимает поверхностный слой до состояния равновесия. Это состояние до сжатия изображено на рис. 7, а.

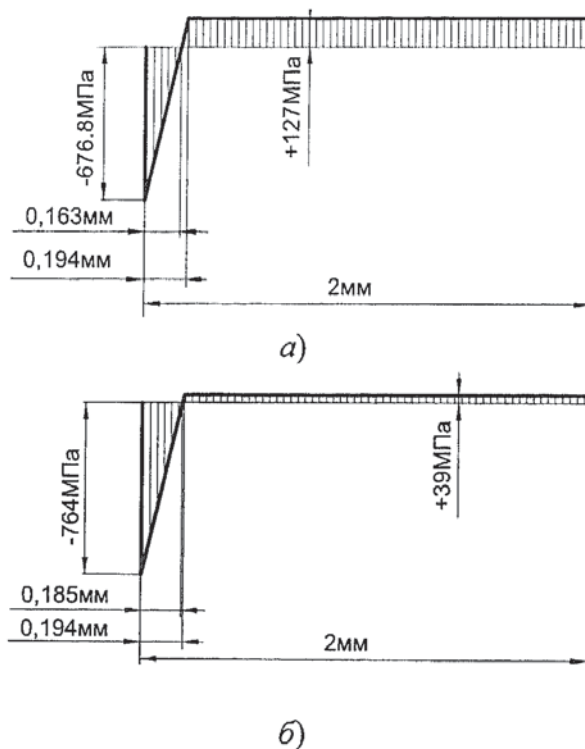


Рис. 7. Состояние выпрямленного образца: а — до равновесия и б — после упругой разгрузки упруго деформированного слоя до состояния равновесия

Как видно из рис. 5, б и 7, б, оба подхода к созданию состояния равновесия дают практически совпадающие результаты, но на рис. 7, а мы наглядно видим аккумулированную во внутреннем объеме материала энергию в виде растянутого внутреннего слоя. Эта энергия, обозначенная на рис. 4, достигает максимума при прогибе пластины $f = 0,3$ мм и расходуется на поддержание сжатия поверхностного слоя в условиях приложения к детали постоянных или переменных напряжений.

При каких условиях энергия, накопленная в упруго растянутом объеме, достигает максимума и как она расходуется на поддержание сжатия поверхностного слоя при переменных напряжениях, мы рассмотрим подробно в последующих публикациях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овсеенко А. Н., Серебренников В. И., Гаек М. М. Технологическое обеспечение качества изделий машиностроения. — М.: МГТУ «Станкин», 2003. — С. 92.
2. Губкин С. И. Пластическая деформация металлов, Т. II — М.: Metallurgizdat, 1961. — 376 с.
3. Mattson R. L. and Almen J. O. Effects of Shot Peening on the Physical Properties of Steel", Office of Scientific Research and Development, War Metallurgy Division, Final Report, Part II, 1945.
4. Рыбаков Г. М. Экспресс-метод контроля качества дробеструйной обработки сложно-нагруженных деталей по критерию остаточных напряжений // Технология машиностроения. — 2007. — № 6. — С. 55—59.
5. Рыбаков Г. М. Программа, содержащая алгоритм управления качеством дробеструйной обработки металлических деталей, работающих в условиях сложного нагружения / Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. — 2005. — №4. — С. 204.