

# Влияние обработки заготовок деталей взрывом на характеристики усталости образцов стали 30ХГСА

## Б.В. Бойцов

д.т.н., профессор, научный руководитель кафедры 104 «Технологическое проектирование и управление качеством» Московского авиационного института (НИУ); Москва

## Г.Н. Кравченко

к.т.н., начальник сектора Московского авиационного института (НИУ); Москва

e-mail: gnkrav@mail.ru

## Ю.В. Петухов

к.т.н., доцент Московского авиационного института (НИУ); Москва

**Аннотация.** На основе эксперимента проведено исследование влияния упрочнения взрывом заготовки на усталостные характеристики стали 30ХГСА. Установлено, что упрочнение взрывчатым веществом (гексоген) повышает предел выносливости образцов из стали 30ХГСА на 28%.

**Ключевые слова:** упрочнение взрывом, усталостная прочность, развитие трещины, сталь 30ХГСА.

К настоящему времени проведен значительный объем исследований по взрывному упрочнению различных марок сталей и цветных металлов [1-6]. В этих работах основное внимание уделялось упрочнению готовых деталей. Так, например, в работе [4] упрочнялись галтели толстостенных валов. Критерием выбора взрывчатого вещества и схемы его расположения на детали являлось достижение максимального увеличения циклической долговечности при условии минимального искажения поверхности детали продуктами взрыва. Увеличение долговечности происходило за счет создания в поверхностных слоях материала остаточных сжимающих напряжений. Однако эффект упрочнения при воздействии ударной волной нельзя объяснить только пластической деформацией металла, так как величина остаточной деформации при взрывном упрочнении значительно меньше, чем при упрочнении статическим деформированием.

В работе [7] показано, что упрочнение металлов под действием ударных волн можно объяснить также структурными изменениями, а именно зарождением новых дислокаций.

В данной статье приведены результаты экспериментальных исследований влияния на сопротивление усталости обработки взрывом заготовок из стали 30ХГСА.

Исходные заготовки диаметром 18 мм (в состоянии поставки) были подвергнуты различным режимам термической обработки.

**I группа заготовок:** термообработка до твердости  $HRC$  45 без обработки взрывом.

**II группа заготовок:** термообработка до твердости  $HRC$  45 с последующим ударным воздействием взрывом с давлением 22 ГПа (взрывчатое вещество – ПБВ).

**III группа заготовок:** термообработка до твердости  $HRC$  39 с последующим ударным воздействием с давлением 10 ГПа (взрывчатое вещество – гексоген).

**IV группа заготовок:** термообработка заготовок до твердости  $HRC$  39 с последующим ударным воздействием с давлением 10 ГПа (взрывчатое вещество – гексоген) и последующий отпуск при температуре 300 °С в течение двух часов.

Обработка заготовок взрывом производилась по цилиндрической схеме нагружения (рис. 1), при которой образец, имеющий диаметр 60 мм, находился внутри взрывчатого вещества.

После проведения ударной обработки взрывом из заготовок были изготовлены стандартные образцы с коэффициентом концентрации напряжения  $\alpha_\sigma = 1,05$  для испытания на консольный изгиб (рис. 2). Припуск на точение составлял 1,5 мм. Средние значения параметров шероховатости образцов после механической обработки в рабочей части имели следующие значения:  $R_a = 0,12$  мкм,  $R_z = 0,7$  мкм,  $R_m = 1,1$  мкм.

Повторные замеры твердости образцов всех четырех групп показали, что твердость образцов, обработанных при давлении 22 ГПа, уменьшилась с  $HRC$  45 до  $HRC$  41. Образцы групп III и IV, обработанные при давлении 10 ГПа, увеличили свою твердость с  $HRC$  39 до  $HRC$  49. Измерения твердости на шлифах, изготовленных из упрочненных образцов, показали, что твердость изготовленных

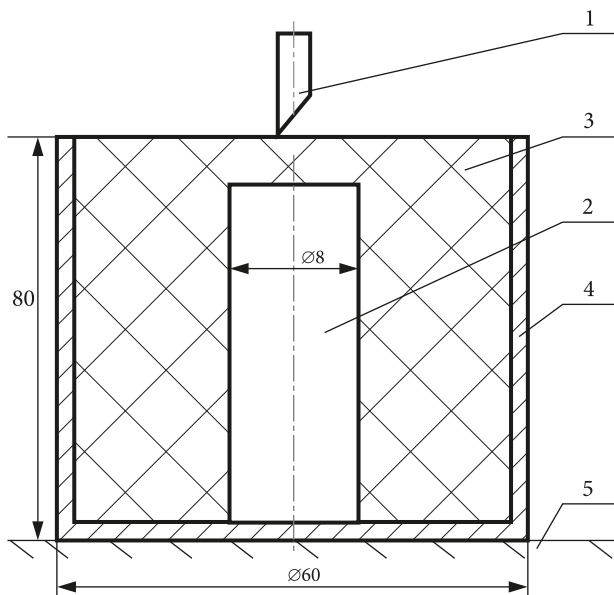


Рис. 1. Схема проведения упрочняющей ударной обработки: 1 – электродетонатор, 2 – заготовка, 3 – взрывчатое вещество, 4 – контейнер, 5 – массивная опора

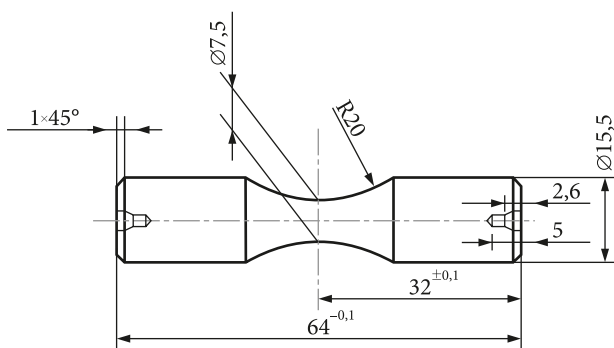


Рис. 2. Образец для проведения усталостных испытаний

из заготовок, обработанных взрывом образцов, не изменяется по глубине.

Усталостные испытания на консольный изгиб проводились на магнитно-резонансной установке ЭД-100М [9], которая позволяет не только регистрировать момент усталостного разрушения образца, но фиксировать зарождение микротрещин (длиной около 0,1 мм) и следить за ее развитием. Результаты испытаний в виде кривых усталости до разрушения образцов представлены на рис. 3, из них видно, что при ударной обработке взрывом с давлением 22 ГПа произошло незначительное улучшение усталостных характеристик материала по сравнению с исходной I группой образцов. Ударная обработка при давлении 10 ГПа привела к увеличению предела выносливости на 28%. Отпуск при температуре 300 °С после ударной обработки давлением 10 ГПа не дал по сравнению со схемой обработки III группы какого-либо изменения усталостных характеристик материала. На

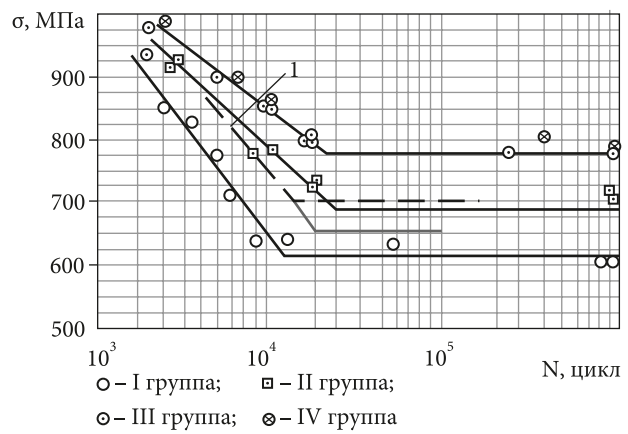


Рис. 3. Результаты усталостных испытаний для сталей 30ХГСН2А – кривая I и 30ХГСА

графике приведена усталостная кривая не упрочненных образцов из стали 30ХГСН2А (кривая 1 на рис. 3). Как видно, ударная обработка взрывом с давлением 10 ГПа повышает усталостные свойства стали 30ХГСА до характеристик усталости стали 30ХГСНА (без упрочняющей обработки).

В процессе усталостных испытаний проводилась фиксация частоты колебаний образца, которая стабильна на этапе накопления повреждений и начинает изменяться при зарождении и развитии усталостной трещины. Для установления зависимости величины усталостной трещины  $h$  от частоты колебаний образца  $f$  была проведена специальная тарировка. Образцы испытывались при двухступенчатом блочном нагружении (рис. 4а). В течение первых 2000 циклов поддерживалась нагрузка с  $\sigma_a = 610$  МПа, затем, в течение 1000 последующих циклов, значение нагрузки было увеличено до  $\sigma_a = 850$  МПа. Такие смены нагрузки продолжали до окончательного разрушения образца. В результате на поверхности излома (рис. 4б) были хорошо видны характерные полосы-отметки с различной шероховатостью, связанные с изменением амплитуды нагружения, а следовательно, и скоростью развития трещины.

На основе анализа экспериментальных данных был построен тарировочный график зависимости частоты колебаний образца  $f$  от величины трещины  $h$  (рис. 5). Как видно из графика, до величины

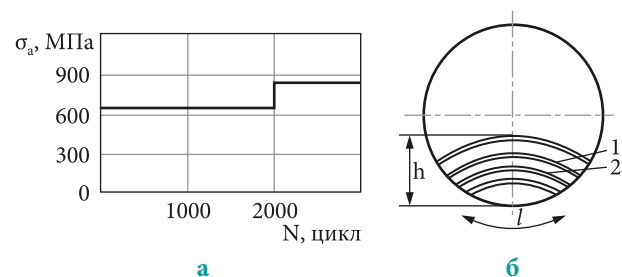


Рис. 4. Блок нагружения (а) и вид усталостного излома образца при балочном нагружении (б)

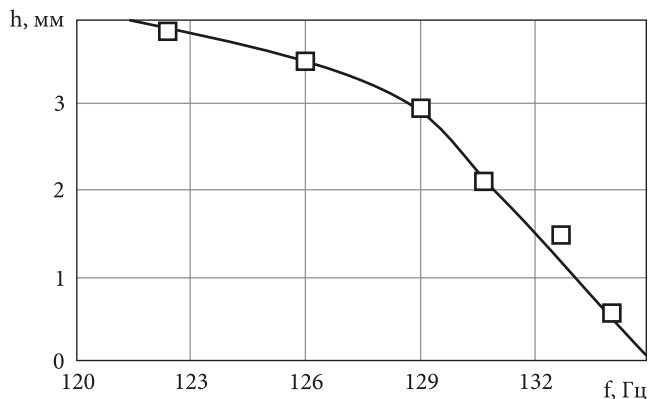


Рис. 5. Тарировочный график зависимости изменения глубины трещины  $h$  от частоты колебаний образца  $f$

трещины  $h < 2,5$  мм зависимость  $h = h(f)$  носит линейный характер, что позволяет по измеренной частоте достаточно точно оценить величину трещины, а следовательно, и скорость ее развития.

На рис. 6 представлены экспериментальные графики зависимости изменения частоты колебаний образца от числа циклов при развитии усталостной трещины в образце, прошедшем ударную обработку давлением 10 ГПа (при амплитуде циклического напряжения  $\sigma_a = 800$  МПа). Из графика рис. 6 видно, что до момента возникновения усталостной трещины частота колебаний образца стабильна; по мере роста трещины частота колебаний уменьшается. Аппроксимируя кривую развития усталостной трещины, считаем точку А началом развития трещины, а интервал АВ<sub>2</sub> – временем развития усталостной трещины. Из графика видно, что обработка взрывом с давлением 10 ГПа привела к увеличению времени развития усталостной трещины по сравнению с неупрочненным образцом.

Это подтверждается и полученными зависимостями времени развития усталостной трещины при других значениях амплитуды напряжения.

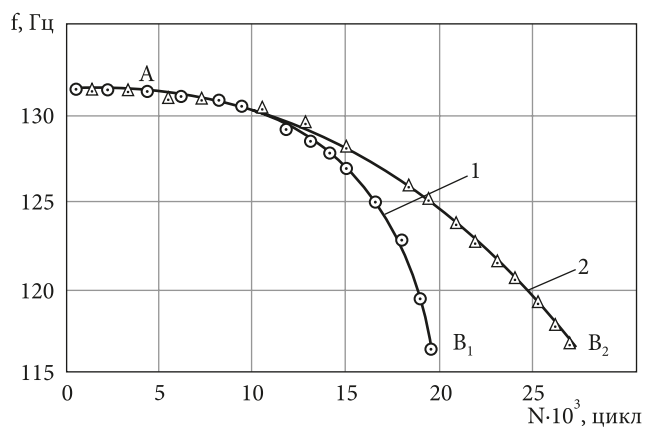


Рис. 6. Зависимость изменения частоты колебаний образца от числа циклов нагружения  $N$  при  $\sigma = 800$  МПа: о – I группа,  $\Delta$  – III группа

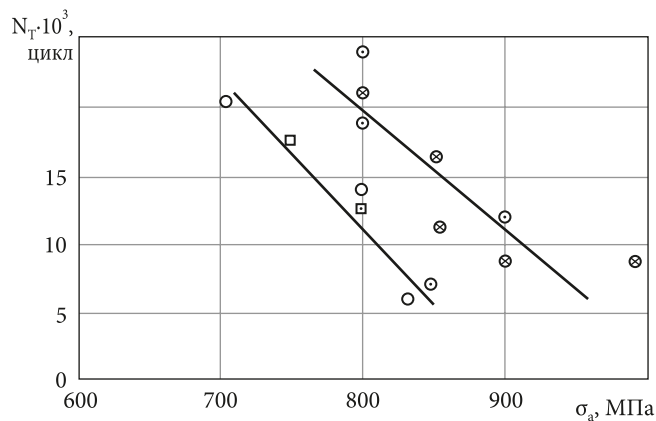


Рис. 7. Зависимость времени развития усталостных трещин от режимов взрывной упрочняющей обработки (о – I группа,  $\square$  – II группа,  $\boxplus$  – III группа,  $\bullet$  – IV группа)

Из рис. 7 видно, что время развития усталостной трещины зависит от режимов обработки. Обработка давлением 10 ГПа привела к увеличению времени развития усталостной трещины в среднем в 1,5 раза. Отпуск при температуре 300 °С после обработки давлением 10 ГПа не повлиял на время развития усталостной трещины. Образцы, обработанные при давлении 22 ГПа, имеют то же самое время развития трещины, что и исходные образцы.

По результатам экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Предложенная схема цилиндрической ударной упрочняющей обработки взрывом заготовок из стали 30ХГСА при использовании в качестве взрывчатого вещества гексогена позволила повысить предел выносливости образцов из стали 30ХГСА на 28%. Такое повышение предела выносливости соответствует увеличению циклической долговечности образцов в 5...10 раз.

2. Использование в ударном упрочнении стали 30ХГСА взрывчатого вещества ПВВ показало малую эффективность в повышении характеристик сопротивления усталости и циклической трещиностойкости.

### Литература

- Грияченко И.Г. Упрочнение деталей из жаропрочных и титановых сплавов. – М.: Машиностроение, 1971. – 120 с.
- Райнхарт Дж. Взрывная обработка металлов. – М.: Мир, 1966. – 391 с.
- Степанов В.Г., Шавров И.А. Импульсная металлообработка в судовом машиностроении. – Л.: Судостроение, 1968. – 251 с.
- Грияченко И.Г., Рыковский Б.П. Упрочнение галтелей толстостенных валов из стали 30ХГСА



взрывом бризантных ВВ // *Авиационная промышленность*. – 1969. – № 7. – С. 25–28.

5. Дерibas А.А. Физика упрочнения и сварка взрывом. – Новосибирск: Наука, 1980. – 221 с.

6. Пашков П.О. Действие ударных волн на закаленные стали. – Волгоград: Нижне-Волж. изд., 1969. – 166 с.

7. Эпштейн Г.И. Строение металлов деформированных взрывом. – М.: Металлургия, 1980. – 255 с.

8. Школьник Л.М. Скорость роста трещин и живучесть металла. – М.: Металлургия, 1973. – 216 с.

9. Бойцов Б.В., Иванов А.Л., Егоров Н.А. Установка для программных испытаний при консольном изгибе. – Заводская лаборатория. – 1981. – № 10. – С. 83–85.

### The Effect of the Processing of Workpieces Details by an Explosion on the Fatigue Characteristics of Steel 30KhGSA Samples

**B.V. Boytsov**, *doctor of technical sciences, professor, head of the department 104 «Technological design and quality management» of Moscow Aviation Institute (National Research University); Moscow*

**G.N. Kravchenko**, *candidate of technical sciences, head of sector of Moscow Aviation Institute (National Research University); Moscow*

*e-mail: gnkrav@mail.ru*

**Yu.V. Petukhov**, *candidate of technical sciences, assistant professor of Moscow Aviation Institute (National Research University); Moscow*

**Summary.** On the basis of an experiment the research of influence of hardening by explosion of preparation on fatigue characteristics of steel 30KhGSA is conducted. It is established that hardening by explosive – hexogen raises a limit of endurance of samples from steel 30KhGSA for 28%.

**Keywords:** hardening by explosion, fatigue durability, crack development, steel 30KhGSA.

### References:

1. Griyachenko I.G. Hardening of parts from heat-resistant and titanium alloys. *Mashinostroenie*. Moscow, 1971. 120 p.

2. Raynkhart J. Explosive processing of metals. *Mir*. Moscow, 1966. 391 p.

3. Stepanov V.G., Shavrov I.A. Pulsed metalworking in marine engineering. *Sudostroenie*. Leningrad, 1968. 251 p.

4. Griyachenko I.G., Rikovsky B.P. Hardening of gait of thick-walled shaft from 30KhGSA steel explosion of brisant Centuries. *Aviatsionnaya promishlennost*. 1969, No. 7. pp. 25–28.

5. Deribas A.A. Hardening physics and explosion welding. *Nauka*. Novosibirsk, 1980. 221 p.

6. Pashkov P.O. The effect of shock waves on hardened steel. *Lower Volga publishing house*. Volgograd, 1969. 166 p.

7. Epstein G.I. The structure of metals deformed by the explosion. *Metallurgy*. Moscow, 1980. 255 p.

8. Shkolnik L.M. Crack growth rate and metal survivability. *Metallurgy*. Moscow, 1973. 216 p.

9. Boitsov B.V., Ivanov A.L., Egorov N.A. Installation for software testing in console bending. *Factory laboratory*. 1981, No. 10. pp. 83–85.