

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ГАЗОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛЕЙ

Д.А. Иванов, к.т.н., доц.,

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации

О.Н. Засухин, зав. лаб.

Балтийский государственный технический университет ВОЕНМЕХ им. Д.Ф. Устинова

Рассматриваются вопросы оптимизации амплитудно-частотных характеристик и продолжительности воздействия газового потока на металлические изделия и заготовки в целях повышения их механических и эксплуатационных свойств. Приведенные данные свидетельствуют о доминирующей роли воздействия газовых импульсов нестационарных течений на структуру и свойства металлических изделий. Установлено, что при использовании резонансных наложений частот колебаний газового потока на собственные колебания изделия более высокое значение ударной вязкости детали может быть достигнуто при сокращении продолжительности обработки в 2 раза.



100 м/с) выше, чем на выходе из успокоительной камеры. Образцы размещались так, что направление обдува совпадало с направлением удара при испытании. Частота пульсаций газового потока составляла 700–1000 Гц при звуковом давлении до 130 дБ. Амплитудно-частотные характеристики при этом не зависели от места расположения образца и единственным варьируемым параметром была скорость натекания пульсирующего газового потока на образец.

Результаты исследования представлены в табл. 1, 2 и на рис. 1–6.

Таблица 1

**Сталь 40Х холодный прокат.  
Зависимость КСУ от продолжительности обдува**

Продолжительность газои́мпульсной обработки, мин	5	10	15	20	25
Ударная вязкость КСУ, МДж/м <sup>2</sup>	0,65	0,65	0,8	0,875	0,8

Образец размещен на выходе из успокоительной камеры

Таблица 2

**Сталь 40Х холодный прокат.  
Зависимость КСУ от продолжительности обдува**

Продолжительность газои́мпульсной обработки, мин	5	10	15	20	25
Ударная вязкость КСУ, МДж/м <sup>2</sup>	1,6	1,8	1,45	1,25	0,6

Образец размещен возле рассекателя газоструйного генератора

Известно положительное влияние, воздействия нестационарными газовыми потоками (газои́мпульсной обработки) на механические и эксплуатационные свойства, а также структуру материалов металлических деталей машин, приборов, других ответственных изделий [1–10].

Вместе с тем нуждаются в дальнейшей оптимизации амплитудно-частотные характеристики воздействующего на металлические изделия и заготовки газового потока, продолжительность воздействия газовых импульсов и влияние скорости газового потока на требуемое повышение механических и эксплуатационных свойств за минимальное количество времени.

Актуальной представляется задача оценки потенциала увеличения производительности газои́мпульсной обработки металлических изделий.

Для решения этой задачи были проведены исследования зависимости механических и эксплуатационных свойств легированных сталей от продолжительности воздействия пульсирующего газового потока и его скорости на примере холодного проката из стали 40Х.

Размещение образцов осуществлялось на выходе из успокоительной камеры установки для газои́мпульсной обработки и возле рассекателя газоструйного генератора, где скорость пульсирующего газового потока более чем втрое (до

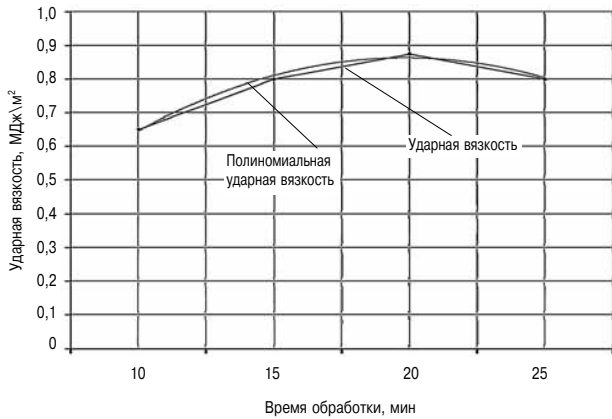


Рис. 1. Сталь 40X холодный прокат.

Зависимость КСУ от продолжительности обдува.

Образец размещен на выходе из успокоительной камеры

В случае размещения образца возле рассекателя уже через 5 минут обработки ударная вязкость увеличивается с 0,65 до 1,6 МДж/м<sup>2</sup>, достигает максимума через 10 минут, а затем начинает снижаться. При этом максимальное значение ударной вязкости достигало 1,8 МДж/м<sup>2</sup> против 0,875 МДж/м<sup>2</sup> при размещении образца на выходе из успокоительной камеры, где скорость ниже более чем в три раза.

Полученные данные свидетельствуют о доминирующей роли газовых импульсов при воздействии нестационарных течений на структуру и свойства металлических изделий, в частности, из легированных сталей и наличии резерва для

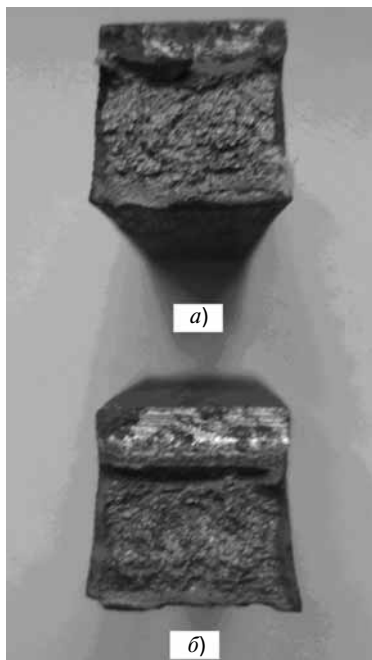


Рис. 2. Сталь 40X холодный прокат. Изломы ударных образцов. Образец размещен на выходе из успокоительной камеры:

а — без обдува; б — обдув 20 мин

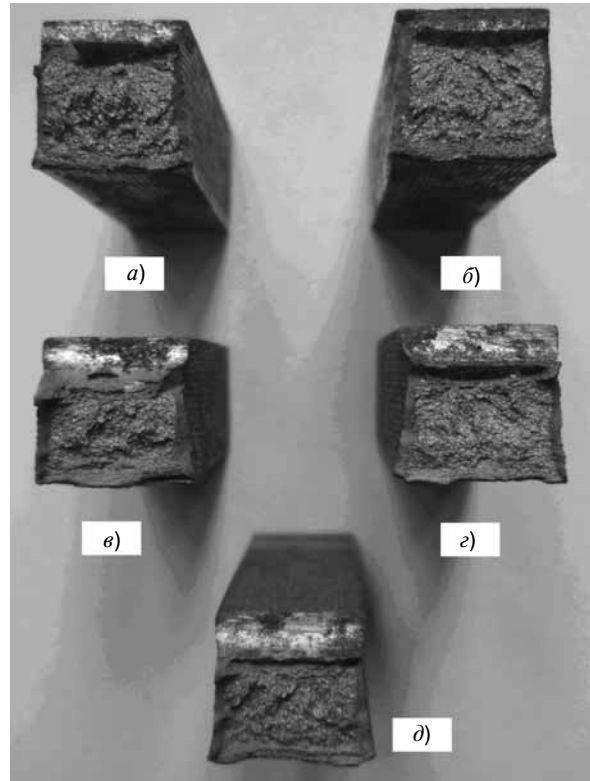


Рис. 3. Сталь 40X холодный прокат. Влияние продолжительности обдува на изломы ударных образцов. Образцы размещены на выходе из успокоительной камеры:

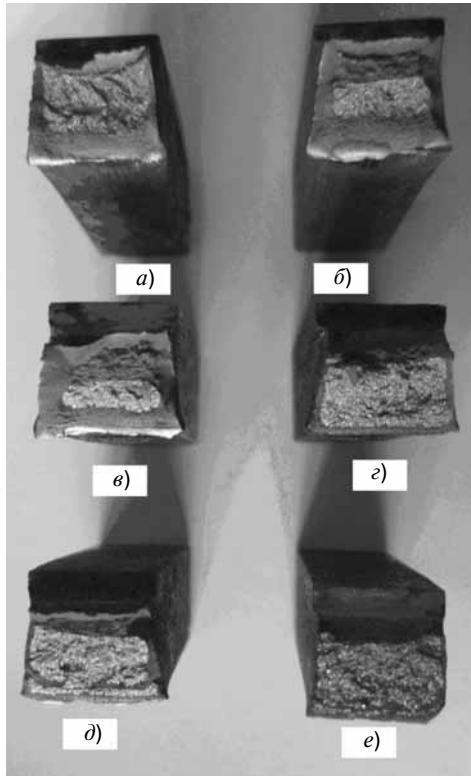
а — 5; б — 10; в — 15; г — 20; д — 25 мин

повышения эффективности и сокращения продолжительности газоимпульсной обработки за счет повышения скорости натекающего на изделие пульсирующего газового потока.

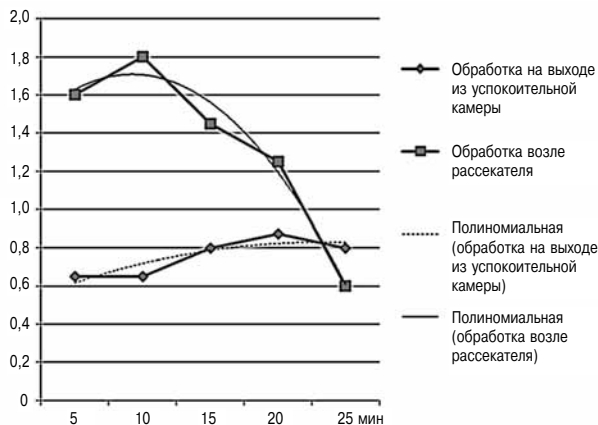
Эффективность воздействия пульсирующих струй газа на конструктивную прочность металлических материалов зависит не только от продолжительности обдува и энергии импульсов газа, но и от частоты этих импульсов.



Рис. 4. Сталь 40X холодный прокат. Зависимость КСУ от продолжительности обдува. Образец размещался возле рассекателя газоструйного генератора



**Рис. 5.** Влияние продолжительности обдува на изломы ударных образцов. Сталь 40Х холодный прокат. Образцы размещены возле рассекателя газового генератора  
*a* – 0; *б* – 5; *в* – 10; *г* – 15; *д* – 20; *е* – 25 мин



**Рис. 6.** Ударная вязкость образцов из холоднокатаной стали 40Х в зависимости от продолжительности обработки и места размещения образца

Если частота импульсов близка к частоте собственных (свободных) колебаний обдуваемого металлического изделия, возможен резонанс и значительный рост воздействующих на металл импульсов, что может способствовать интенсификации процессов дислокационной перестройки структуры металлического материала и изменению его механических свойств.

Поэтому перед обдувом изделия необходимо оценить его собственную частоту колебаний и по-

добрать режим истечения пульсирующей струи газа, при котором ее амплитудно-частотная характеристика содержит дискретную компоненту звукового давления, значительно превышающую уровень сплошной составляющей на частоте, близкой к частоте собственных колебаний изделия.

Частоту собственных колебаний предметов простой формы, закрепленных тем или иным способом и выводимых из положения равновесия набегающим на предмет потоком газа (внешняя возмущающая сила) можно оценить по известной формуле механики

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m}},$$

где  $f_0$  — частота собственных колебаний тела, Гц;  $m$  — масса тела, кг;  $c$  — жесткость тела Н/м.

Последняя величина зависит от вида упругой деформации, которой подвержено обдуваемое тело: растяжение (сжатие); срез; изгиб; кручение.

Для тел простой формы типа стержней длиной  $l$  и площадью поперечного сечения  $F$  жесткость можно определить по формулам сопротивления материалов.

Мерой жесткости при упругом растяжении (сжатии), соответствующем продольному обтеканию стержня, является площадь поперечного сечения стержня и его жесткость:

$$C = \frac{EF}{l},$$

где  $E$  — модуль Юнга, Па, определяемый видом материала.

В случае изгиба жесткость стержня зависит не только от площади поперечного сечения и его длины, но и от осевого момента инерции  $J$  сечения относительно изгибаемой оси.

Мерой жесткости в этом случае является произведение момента инерции на модуль Юнга и жесткость при изгибе:

$$C = k \frac{EF}{l^3}.$$

Безразмерный коэффициент  $k$  зависит от способа закрепления стержня и прикладываемой нагрузки.

В случае равномерно распределенной нагрузки по длине стержня для консоли  $k = 8$ , а для стержня, закрепленного концами,  $k \approx 77$ .

Таким образом, при определении жесткости тел простой формы можно воспользоваться формулами сопротивления материалов.

Если обдуваемое тело имеет сложную форму, его можно разбить на  $n$  простых тел и определить собственную частоту тела из соотношения

$$\frac{1}{f_0} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{f_{0i}},$$

Таблица 3

**Сталь 40X холодный прокат.**  
**Зависимость КСУ от продолжительности обдува на резонансных частотах, возникающих при  $p = 0,6$  атм**

Продолжительность газои́мпульсной обработки, мин	0	5	10	15
Ударная вязкость КСУ, МДж/м <sup>2</sup>	0,6	0,8	0,85	0,375

Образец размещен на выходе из успокоительной камеры

Таблица 4

**Сталь 40X холодный прокат.**  
**Зависимость КСУ от продолжительности обдува на резонансных частотах, возникающих при  $p = 0,6$  атм**

Продолжительность газои́мпульсной обработки, мин	5	10	15	20
Ударная вязкость КСУ, МДж/м <sup>2</sup>	0,65	0,8	0,975	0,575

Образец размещен на выходе из успокоительной камеры

где  $f_{0i}$  — собственная частота колебаний  $i$ -й составляющей тела.

Знание собственной частоты колебаний обтекаемого тела всегда полезно.

Это величина, к которой надо стремиться, чтобы ускорить процесс упрочнения, или избежать ее, чтобы не вызвать вибрации изделия и его разрушение.

Для того чтобы раскачать систему, но не разрушить ее, следует максимально приблизиться к резонансной области, не достигая значения  $f_0$  и не допуская резонанса.

Частота вынужденных колебаний образца в целом соответствуют частоте колебаний натекающего на него газового потока. Собственные колебания образца рассчитываются по формуле в зависимости от массы, длины, модуля Юнга и момента инерции. При совпадении частот колебаний параметров потока с собственными колебаниями образца (системы) должны наблюдаться резонансные эффекты, оказывающие дополнительное воздействие на структуру материала.

Частота собственных или свободных поперечных колебаний балки, выведенной из состояния покоя и предоставленной самой себе, под действием восстанавливающей упругой силы  $F$ :

$$n_0 = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{31,3}{\sqrt{\Delta_{ст}}}$$

или

$$n_0 \equiv \frac{300}{\sqrt{\Delta_{ст}}}$$

где  $n_0$  — число колебаний в минуту,  $\Delta_{ст}$  — статическое перемещение от действия сосредоточенной массы, см.

При изгибе балки  $\Delta_{ст} = f$  (прогиба балки).

Для консоли  $\Delta_{ст} = Ql^3/3EI$ ,

где  $Q$  — вес сосредоточенной массы, кг (собственно масса балки);  $l$  — длина, см (половина от длины балки, так как сосредоточенная масса);  $E$  — модуль упругости, кг/см<sup>2</sup> (для стали —  $2,1 \cdot 10^6$ );  $I$  — момент инерции, см<sup>4</sup>.

Для круглого сечения  $I = \pi d^4/64$ , для квадратного сечения  $I = h^4/12$ , где  $h$  — сторона квадрата, см.

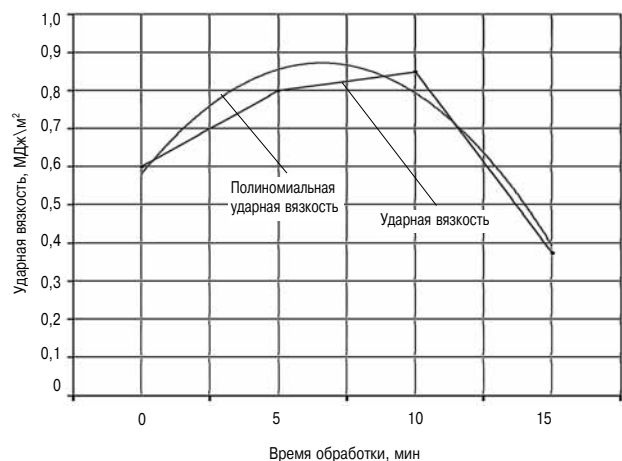
Для стандартного ударного образца квадратного сечения со стороной 1 см:

$\Delta_{ст} = 0,91/525\ 000 = 0,00000174$ ,  $\sqrt{\Delta_{ст}} = 0,00132$ ,  $n_0 = 227\ 273$  колебаний в минуту, или 3787 Гц.

Пик колебаний параметров потока на близкой частоте наблюдался при  $p = 0,6$  атм с образцом. При размещении ударных образцов из холодного проката стали 40 и 40X поперек потока, закрепленными за один конец, после обдува ударная вязкость в случае стали 40 при газои́мпульсной обработке составила: в течение 5 мин —

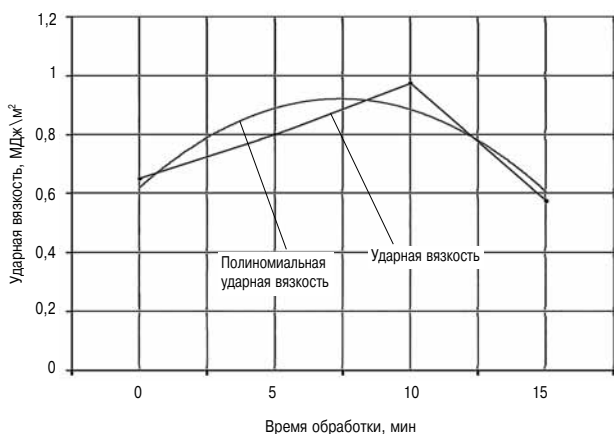
0,8 МДж/м<sup>2</sup>, 10 мин — 0,85 МДж/м<sup>2</sup>, 15 мин — 0,375 МДж/м<sup>2</sup> (табл. 3, график рис. 7) против 0,6 МДж/м<sup>2</sup> без обдува.

В случае холодного проката из стали 40 при таком способе обработки значение ударной вязкости 0,85 МДж/м<sup>2</sup> достигается за 10 мин вместо 15 в случае обдува при давлении 1 атм, где скорость потока выше, но резонансные явления отсутствуют.



**Рис. 7. Ударная вязкость образцов из холоднокатаной стали 40 в зависимости от продолжительности газои́мпульсной обработки на резонансных частотах**

Образцы были расположены поперек потока, на выходе из успокоительной камеры установки



**Рис. 8.** Сталь 40X, холодный прокат. Зависимость КСУ от продолжительности обдува на резонансных частотах. Образец размещен на выходе из успокоительной камеры так, что направление обдува совпадало с направлением удара при испытании

Ударная вязкость холодного проката из стали 40X составила при газоимпульсной обработке в течение 5 мин — 0,8 МДж/м<sup>2</sup>, 10 мин — 0,975 МДж/м<sup>2</sup> и 15 мин — 0,575 МДж/м<sup>2</sup> (табл. 4, график рис. 8) против 0,65 МДж/м<sup>2</sup> без обдува. Все образцы размещались на выходе из успокоительной камеры установки для газоимпульсной обработки.

В случае стали 40X максимальное значение ударной вязкости 0,975 МДж/м<sup>2</sup> достигается за 10 мин, в то время как при обдуве при давлении 1 атм с более высокой скоростью, но без резонансного наложения частот, максимальное значение ударной вязкости составляет 0,875 МДж/м<sup>2</sup> и достигается за 20 мин.

Для термообработанной стали 40X также выявлено ускорение изменения структуры и механических свойств в результате обработки пульсирующим газовым потоком на резонансных частотах. Так, для закаленных на мартенсит образцов в результате обдува на резонансных частотах уже через 5 мин ударная вязкость достигает значения 0,1 МДж/м<sup>2</sup> против 0,0125 МДж/м<sup>2</sup> в закаленном состоянии без обдува, что свиде-

тельствует о более интенсивном протекании отпускных процессов, инициируемых механическими волнами, возникающими в результате пульсаций давления газа на поверхности изделия, в сравнении с газоимпульсной обработкой на частотах, отличных от резонансных.

Таким образом, при использовании резонансных наложении частот колебаний газового потока на собственные колебания изделия то же или более высокое значение ударной вязкости может быть достигнуто при сокращении продолжительности обработки до 2 раз.

### Литература

1. Иванов Д.А. Повышение конструктивной прочности машиностроительных сталей путем импульсного воздействия при отпускном охлаждении // Двигателестроение. — 2005. — № 4. — С. 30–32.
2. Иванов Д.А., Засухин О.Н. Газоимпульсная обработка машиностроительных материалов без предварительного нагрева // Двигателестроение. — 2010. — № 2. — С. 20–22.
3. Иванов Д.А., Засухин О.Н. Повышение конструктивной прочности машиностроительных материалов в результате сочетания термической и газоимпульсной обработки // Двигателестроение. — 2012. — № 3. — С. 12–15.
4. Иванов Д.А., Засухин О.Н. Обработка пульсирующим газовым потоком высокопрочных и пружинных сталей // Двигателестроение. — 2014. — № 3. — С. 34–36.
5. Иванов Д.А., Засухин О.Н. Сочетание закалки сталей с обработкой пульсирующими газовыми потоками // Двигателестроение. — 2015. — № 4. — С. 34–36.
6. Иванов Д.А. Воздействие газоимпульсной обработки на структуру и механические свойства нормализуемых сталей // Техничко-технологические проблемы сервиса. — 2013. — № 3. — С. 19–22.
7. Воробьева Г.А., Иванов Д.А., Сизов А.М. Упрочнение легированных сталей термоимпульсной обработкой // Технология металлов. — 1998. — № 2. — С. 6–8.
8. Бульчев А.В., Иванов Д.А. Воздействие газоимпульсной обработки на структуру, свойства и напряженное состояние металлических изделий // Технология металлов. — 2013. — № 11. — С. 30–33.
9. Иванов Д.А., Засухин О.Н. Использование пульсирующего дозвукового газового потока для повышения эксплуатационных свойств металлических изделий // Технология металлов. — 2015. — № 1. — С. 34–38.
10. Иванов Д.А., Засухин О.Н. Повышение коррозионной стойкости конструкционных сталей газоимпульсной обработкой // Технология металлов. — 2015. — № 10. — С. 27–31.