

ВЛИЯНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

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

А.А. Колосков, аспирант

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации

Представлены результаты исследования влияния обработки пульсирующим дозвуковым газовым потоком на коррозионную стойкость конструкционных металлических материалов, используемых для изготовления деталей двигателей, работающих в агрессивных средах. Показано, что образцы, подвергнутые обработке после пребывания в водном растворе HCl теряют массу медленнее, чем необработанные образцы. Установлено, что эффект повышения коррозионной стойкости возникает вследствие устранения дефектов кристаллического строения под действием механических волн, вызванных пульсациями воздушного потока, натекающего на образец. Как показывают результаты исследования, чем продолжительнее воздействие агрессивной среды, тем в большей степени проявляется положительное воздействие газоимпульсной обработки на коррозионную стойкость. По мере распространения коррозии в глубинные слои образца, различие в скорости потери массы у обработанных и необработанных образцов сохранялось, что свидетельствует об объемном характере эффекта повышения коррозионной стойкости.



металла, что способствует интенсификации дальнейшего корродирования.

Коррозионная стойкость деталей может быть повышена не только использованием покрытий, протекторов или введением дорогостоящих легирующих добавок, но и механической обработкой.

Для повышения коррозионной стойкости металлических конструкционных материалов применяются различные методы механической обработки. Известно, что снижение растягивающих напряжений, например, в результате обкатки роликом может приводить к повышению коррозионной стойкости металлических деталей. Схожие результаты повышения коррозионной стойкости дает и дробеструйная обработка, причем вне зависимости от величины и знака исходных остаточных напряжений.

Были проведены исследования влияния обработки пульсирующим дозвуковым газовым потоком (газоимпульсной обработки) на коррозионную стойкость деталей из углеродистых и легированных конструкционных сталей, работающих в агрессивных средах. Ранее этот вид обработки показал высокую эффективность при повышении механических свойств металлических материалов [1–10].

Образцы из стали 40 предварительно закаливали в воде с температуры 850 °С, после чего часть образцов подвергалась отпуску при температуре 200 °С. Другая часть образцов была обработана в течение 15 минут пульсирующим дозвуковым

Металлические детали машин, в том числе авиационных двигателей, такие как валы, бандажные полки, клапаны, крепеж и другие детали подвергаются коррозии, особенно при взаимодействии с агрессивными средами. При этом очаги коррозии не всегда удается своевременно выявить неразрушающими методами контроля при техническом обслуживании, поэтому актуальной является задача повышения их коррозионной стойкости.

Коррозия сопровождается потерей массы детали, ведущей к уменьшению ее прочности, а также повышению риска пластического деформирования и разрушения в процессе передачи усилия. При этом снижается чистота поверхности

Таблица 1

Изменение массы образцов из стали 40 в ходе коррозионных испытаний в 4 %-ном водном растворе HCl

Обработка	Масса, г				
	Исходная масса	5 сут	10 сут	15 сут	20 сут
Закалка + низкий отпуск	26,12	25,02	24,77	24,12	23,5
Закалка + газоимпульсная обработка	26,46	25,61	25,4	24,95	24,57

Таблица 2

Потеря массы образцов из стали 40 в ходе коррозионных испытаний

Обработка	Потеря массы, г			
	5 сут	10 сут	15 сут	20 сут
Закалка + низкий отпуск	1,1	0,25 (1,35)	0,65 (2,00)	0,62 (2,62)
Закалка + газоимпульсная обработка	0,85	0,21 (1,06)	0,45 (1,51)	0,38 (1,89)

В скобках указана суммарная потеря массы за данный промежуток времени.

воздушным потоком, обладающим частотой порядка 1130 Гц.

Испытания на коррозионную стойкость осуществлялись погружением образцов в 4 %-ный водный раствор HCl на 20 суток с промежуточным контролем изменения массы через 5 суток (табл. 1), сопровождающимся обновлением раствора.

В табл. 2 приведены результаты измерения потери массы образцов из стали 40 за 0–5, 5–10, 10–15, 15–20 сутки коррозионных испытаний.

Относительная потеря массы образцов после газоимпульсной обработки за 20 суток составила 7,14 %, а при закалке с последующим низким отпуском — 10,03 %.

Потеря массы на единицу площади за 20 суток рассчитывалась по формуле

$$\Delta m = (m_0 - m_1)/S,$$

где m_0 — масса до испытания, кг; m_1 — масса после испытания, кг; S — площадь поверхности, м²; $\Delta m = 1,078$ кг/м² при закалке с обдувом и 1,495 кг/м² — при закалке с низким отпуском.

Скорость коррозии V_K составила 0,0539 кг/м²·сут после газоимпульсной обработки и 0,0748 кг/м²·сут в случае закалки с последующим низким отпуском.

Положительное влияние газоимпульсной обработки на коррозионную стойкость образцов из стали 40 показано на рис. 1.

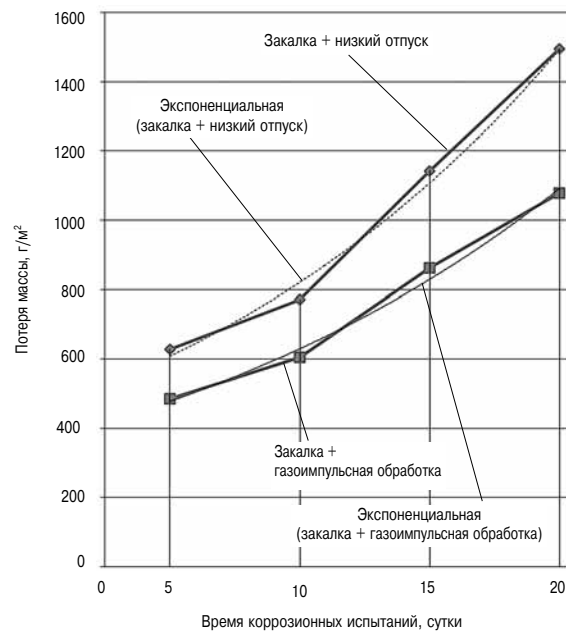


Рис. 1. Влияние газоимпульсной обработки на потерю массы образцов из стали 40 при коррозионных испытаниях

Повышение коррозионной стойкости связано с более значительной, чем при стандартном отпускном нагреве, релаксацией растягивающих остаточных напряжений на поверхности изделий в результате обдува пульсирующим газовым потоком, а также меньшим количеством продуктов распада мартенсита (прежде всего вторичных карбидов).

Потеря твердости закаленной стали 40 после обдува низкочастотным воздушным потоком составила менее 2 единиц HRC в сравнении с образцом после отпуска при температуре 200 °С — более 2 единиц HRC.

Можно сделать вывод, что газоимпульсная обработка оказывает положительное влияние на механические свойства, надежность и долговечность термоупрочненных изделий из конструкционных среднеуглеродистых сталей.

В дальнейшем было проведено исследование воздействия газоимпульсной обработки на коррозионную стойкость легированных конструкционных сталей.

Среднеуглеродистые легированные конструкционные стали, такие как сталь 40X в высокопрочном состоянии чувствительны к коррозии под действием напряжений.

Для оценки влияния газоимпульсной обработки на коррозионную стойкость конструкционных легированных сталей в высокопрочном состоянии образцы из стали 40X закаливали в воде с температуры 860 °С, после чего часть образцов подвергалась отпуску при температуре 200 °С, в то время как остальные образцы были обработаны в течение 15 минут пульсирующим дозвуковым

Таблица 3

**Изменение массы образцов из стали 40X
в ходе коррозионных испытаний
в 4 %-ном водном растворе HCl**

Обработка	Масса, г				
	Исходная масса	5 сут	10 сут	15 сут	20 сут
Закалка + низкий отпуск	17,67	17,61	17,43	17,09	17,05
Закалка + газои́мпульсная обработка	17,76	17,72	17,57	17,28	17,27

воздушным потоком частотой порядка 1130 Гц и звуковым давлением до 120 дБ. Испытания на коррозионную стойкость осуществлялись путем погружения образцов в 4 %-ный водный раствор HCl на 20 суток с промежуточным контролем изменения массы через 5 суток, сопровождающимся обновлением раствора.

В табл. 3 приведены результаты измерения потери массы образцов из стали 40X за 0–5, 5–10, 10–15, 15–20 сутки коррозионных испытаний.

Относительная потеря массы образцов за 20 суток составила 2,8 % после газои́мпульсной обработки и 3,5 % после закалки с последующим низким отпуском.

Потеря массы на единицу площади за 20 суток составила: $\Delta m = 0,2 \text{ кг/м}^2$ в случае закалки с последующей газои́мпульсной обработкой и $0,26 \text{ кг/м}^2$ при закалке с низким отпуском.

Скорость коррозии V_k составила $0,01 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сут}$ в случае газои́мпульсной обработки и $0,013 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сут}$ в случае закалки с последующим низким отпуском.

Потеря массы за время коррозионных испытаний образцов из стали 40X с 5-х по 20 сутки приведена на гистограмме (рис. 2).

Среднее значение твердости при закалке с последующей газои́мпульсной обработкой составило 51 HRC, а с последующим низким отпуском — 50 HRC.

Повышение коррозионной стойкости стали 40X связано с тем, что газои́мпульсная обработка более эффективно по сравнению с низким отпуском устраняет нежелательные растягивающие остаточные напряжения, образующиеся в результате закалки на поверхности стальных изделий, а также с их более однородной структурой, благодаря меньшему выделению карбидной фазы.

Таким образом, замена низкого отпуска газои́мпульсной обработкой делает технологический процесс достижения легированными конструкционными сталями высокопрочного состояния более экономичным. При этом сохраняются высокие значения показателей твердости и проч-

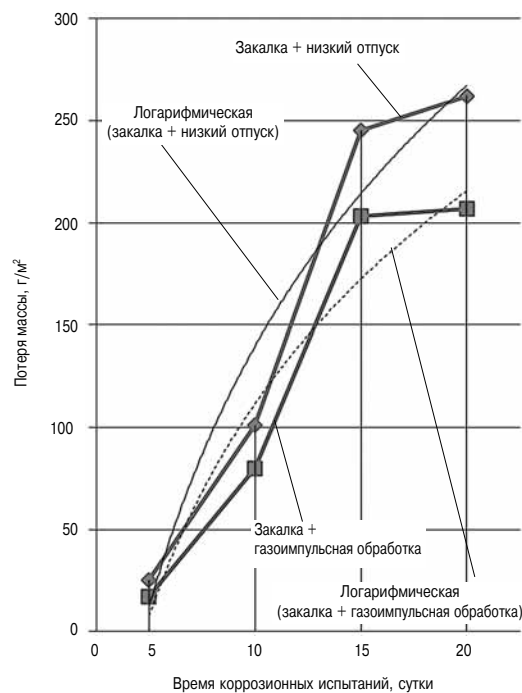


Рис. 2. Влияние газои́мпульсной обработки на потерю массы образцов из стали 40X при коррозионных испытаниях

ности, обеспечивается достаточная надежность при повышении коррозионной стойкости.

Также исследовалось влияние газои́мпульсной обработки на коррозионную стойкость легированной конструкционной стали 12ХН, применяемой для изготовления зубчатых колес, пальцев и других ответственных деталей бытовых машин, работающих в условиях ударных и знакопеременных нагрузок, в состоянии поставки.

Образцы из стали 12ХН цилиндрической формы диаметром $d_0 = 16 \text{ мм}$ и высотой $h_0 = 19,6 \text{ мм}$ были обработаны в течение 12 минут пульсирующим дозвуковым воздушным потоком, обладающим частотой порядка 2100 Гц и звуковым давлением до 140 дБ.

Испытания на коррозионную стойкость осуществлялись погружением образцов в 4 %-ный водный раствор HCl на 15 суток с промежуточным контролем изменения массы.

У образцов, подвергнутых газои́мпульсной обработке, в результате пребывания в 4 %-ном водном растворе HCl продолжительностью 15 суток потеря массы на 24 % меньше, чем у необработанных образцов (табл. 4, рис. 3), что может быть объяснено релаксацией остаточных микронапряжений, присутствовавших в холоднокатаном прутке под действием механических волн, вызванных пульсациями воздушного потока, натекающего на образец, и свидетельствует об эффективности применения пульсирующего дозвукового газового потока для повышения кор-

Таблица 4

Потеря массы образцов из стали 12ХН в состоянии поставки и подвергнутых газоимпульсной обработке за время коррозионных испытаний в 4%-ном водном растворе HCl

Обработка	Потеря массы, г		
	0	7 сут	15 сут
Состояние поставки	31,03	30,86 (0,17)	30,16 (0,70)
Газоимпульсная обработка 12 мин	30,9	30,77 (0,13)	30,24 (0,33)

В скобках указана потеря массы в сравнении с непосредственно предыдущей

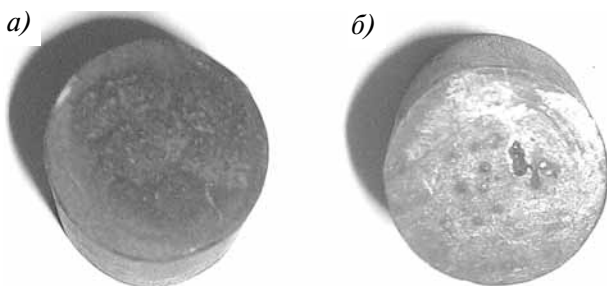


Рис. 3. Образцы из стали 12ХН после пребывания в 4%-м водном растворе HCl продолжительностью 15 суток: а — состояние поставки; б — газоимпульсная обработка

розионной стойкости легированных конструкционных сталей.

Как показывают результаты исследования, чем продолжительнее воздействие агрессивной среды, тем в большей степени проявляется положительное воздействие газоимпульсной обработки на коррозионную стойкость. По мере распространения коррозии в глубинные слои, различие в потере массы во времени у обработанных и необработанных образцов не становилось меньше, что свидетельствует об объемном характере достигнутого эффекта повышения коррозионной стойкости.

В отличие от чистого алюминия, многие алюминиевые сплавы не отличаются высокой коррозионной стойкостью. Латунь при содержании цинка, превышающем 20 %, склонна к коррозионному растрескиванию в наклепанном состоянии. Поэтому задача повышения устойчивости данных сплавов к коррозии остается актуальной.

Пластины из алюминиевого сплава АМг6 подвергали газоимпульсной обработке при частоте колебаний параметров потока 900 Гц и импульсном воздушном давлении 130 дБ. Обдув осуществлялся в течение 15 мин.

Коррозионные испытания проводились в 40 %-ном водном растворе HCl.

Относительная потеря массы образцов за 5 суток составила 12,8 % в случае газоимпульсной обработки и 64 % — без обработки (рис. 4).

Потеря массы на единицу площади за 5 суток составила $\Delta m = 297,3 \text{ кг/м}^2$ в случае газоимпульсной обработки и $1405,4 \text{ кг/м}^2$ — без обработки.

Скорость коррозии V_k составила $59,5 \text{ кг/м}^2\cdot\text{сут}$ в случае газоимпульсной обработки и $281 \text{ кг/м}^2\cdot\text{сут}$ — без обработки (табл. 5).

При тех же режимах проводилась газоимпульсная обработка пластин из латуни Л68. Коррозионные испытания проводились в 20 % водном растворе HCl.

Относительная потеря массы образцов за 20 суток составила 0,8 % при газоимпульсной обработке и 3 % — без обработки.

Потеря массы на единицу площади за 20 суток составила $\Delta m = 0,08 \text{ кг/м}^2$ в случае газоимпульсной обработки и $0,02 \text{ кг/м}^2$ — без обработки. Скорость коррозии V_k составила $0,001 \text{ кг/м}^2\cdot\text{сут}$ в случае газоимпульсной обработки и $0,004 \text{ кг/м}^2\cdot\text{сут}$ — без обработки (табл. 6).

Таким образом, в результате проведения исследования получен положительный технологический результат, а именно: повышена коррозионная стойкость изделий из конструкционных сталей и цветных сплавов на значительную глубину.

Таблица 5

Влияние газоимпульсной обработки на коррозионную стойкость алюминиевого сплава АМг6

Обработка	Относительная потеря массы, %	Потеря массы на единицу площади, кг/м ²	Скорость коррозии, кг/м ² ·сут
Без газоимпульсной обработки	64	1405,4	281
Газоимпульсная обработка 15 мин	12,8	297,3	59,5

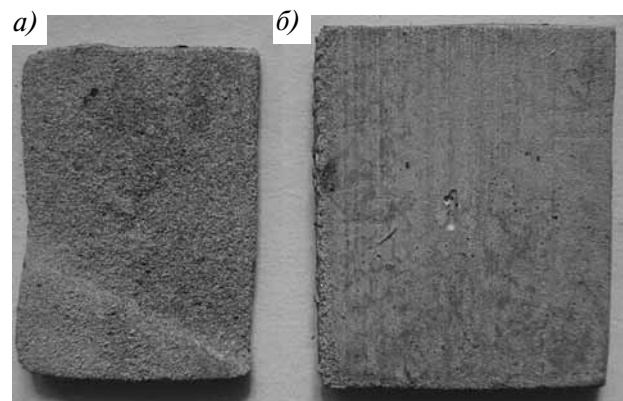


Рис. 4. Образцы из АМг6 после 5 суток выдержки в 40 %-ном водном растворе HCl: а — без обработки; б — газоимпульсная обработка

Таблица 6

**Влияние газоимпульсной обработки
на коррозионную стойкость латуни Л68**

Обработка	Относительная потеря массы, %	Потеря массы на единицу площади, кг/м ²	Скорость коррозии, кг/м ² ·сут
Без газоимпульсной обработки	3	0,08	0,004
Газоимпульсная обработка 15 мин	0,8	0,02	0,001

а)



б)

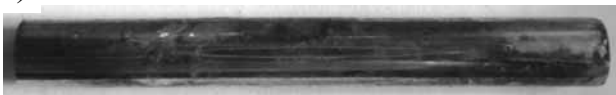


Рис. 5. Хромированная трубка из латуни Л70 после воздействия агрессивной среды:

а — без обработки; б — газоимпульсная обработка

Химико-термическая обработка, в частности хромирование, может быть эффективным способом защиты поверхности изделий от коррозии. Вместе с тем актуальна задача повышения стойкости к агрессивным средам самого коррозионно-стойкого покрытия. При решении данной задачи хромированную трубку из латуни Л70 наружным диаметром 6 мм и толщиной стенки 0,4 мм подвергали в течение 15 мин газоимпульсной обработке при частоте колебаний параметров потока 900 Гц и импульсном воздушном давлении 130 дБ.

Коррозионные испытания проводились в 20 %-ном водном растворе HCl. В ходе данных испытаний обработанный и контрольный образцы выдерживали в агрессивной среде одинаковый промежуток времени.

Результаты, представленные на фотографии (рис. 5), демонстрируют более высокую устойчивость хромированного слоя к воздействию агрессивной среды после газоимпульсной обработки.

Таким образом, газоимпульсная обработка способствует повышению коррозионной стойкости изделий из конструкционных сталей и цветных сплавов, положительно влияет на механические и эксплуатационные свойства металлических деталей машин [1–10].

Литература

1. Иванов Д.А. Повышение конструктивной прочности материалов за счет воздействия пульсирующих дозвуковых низкочастотных газовых потоков: монография. — СПб.: Изд-во СПбГУСЭ, 2008. — 123 с.
2. Иванов Д.А. Повышение конструктивной прочности металлических материалов путем их обработки нестационарными газовыми потоками без предварительного нагрева // Техничко-технологические проблемы сервиса. — 2011. — № 4. — С. 24–29.
3. Иванов Д.А., Засухин О.Н. Использование газоимпульсной обработки в процессе термического упрочнения деталей бытовых машин // Техничко-технологические проблемы сервиса. — 2012. — № 4. — С. 33–37.
4. Иванов Д.А., Засухин О.Н. Газоимпульсная обработка машиностроительных материалов без предварительного нагрева // Двигателестроение. — 2010. — № 2. — С. 20–22.
5. Иванов Д.А., Засухин О.Н. Повышение конструктивной прочности машиностроительных материалов в результате сочетания термической и газоимпульсной обработки // Двигателестроение. — 2012. — № 3. — С. 12–15.
6. Иванов Д.А., Засухин О.Н. Обработка пульсирующим газовым потоком высокопрочных и пружинных сталей // Двигателестроение. — 2014. — № 3. — С. 34–36.
7. Иванов Д.А., Засухин О.Н. Сочетание закалки сталей с обработкой пульсирующими газовыми потоками // Двигателестроение. — 2015. — № 4. — С. 34–36.
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. Обработка инструментальных сталей пульсирующими газовыми потоками // Технология металлов. — 2016. — № 9. — С. 39–43.