

Кирпичёв В.А., Костичев В.Э., Денискина Е.А., Нагиев А.В.

ВЛИЯНИЕ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ МОЛИБДЕНОМ НА НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ДЕТАЛЕЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАБОЧИХ НАГРУЗОК

Для повышения сопротивления усталости деталей, работающих в условиях высоких знакопеременных нагрузок, в настоящее время наряду с упрочнением различными методами поверхностным пластическим деформированием (ППД) и химико-термической обработкой (ХТО) нередко применяют напыление тугоплавкими металлами, одним из которых является молибден. Газотермическое напыление молибдена позволяет повысить износостойкость контактной поверхности и временное сопротивление разрыву, особенно в условиях высокотемпературного нагружения.

Блокировочные кольца синхронизаторов при частом переключении работают в условиях высокотемпературного нагрева за счёт трения внутреннего диаметра кольца и конуса шестерни при выравнивании угловых скоростей ведущей и ведомой шестерён. При постоянном изменении температуры и под действием знакопеременной нагрузки со стороны муфты включения передач в концентраторах напряжений (пазах на внутреннем диаметре кольца) появляются усталостные микротрещины, приводящие к разрушению кольца (рисунок 1).

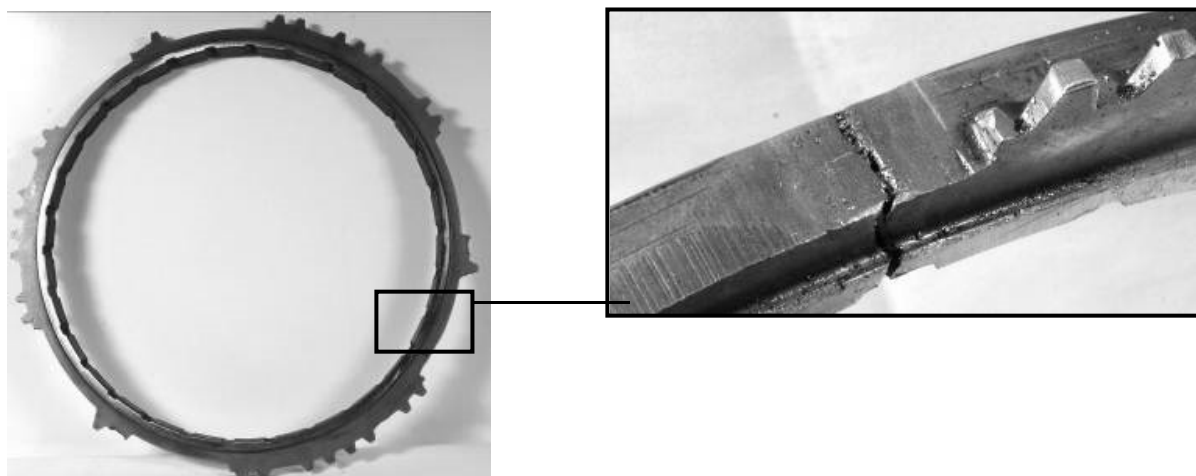


Рисунок 1 – Усталостное разрушение блокировочного кольца синхронизатора КПП

Для повышения сопротивления усталости блокировочных колец на ПАО «Автодизель» выполняется газотермическое напыление молибдена на внутренний диаметр фрикционной поверхности. Данная обработка позволяет повысить предел выносливости кольца, однако большая толщина напыляемого слоя (до 0,6 мм) приводит к существенному расходу молибденовой проволоки и, следовательно, повышению

себестоимости детали. Проверка упрочняющей обработки производится путём выборки из партии 1-2 колец и проведением разрушающего контроля, что также приводит к неизбежным затратам.

Для оценки минимально возможной толщины молибденового слоя, позволяющего обеспечить требуемый уровень сопротивления усталости детали, произведена оценка напряжённо-деформированного состояния (НДС) кольца под действием повышенной нагрузки. Средствами программного комплекса ANSYS/LS-DYNA создана модель блокировочного кольца. Для основного объёма модели (со свойствами стали 40ХФА) выбран тип конечного элемента Solid163, а для поверхностного слоя (со свойствами молибдена) – Thin-Shell163. Тип элемента Thin-Shell163 позволяет без создания отдельного выделенного объёма поверхностного слоя изменять толщину зоны упрочнения для каждой точки интегрирования конечного элемента.

К полученной конечно-элементной модели (рисунок 2, а) прикладывалось усилие $F = 3$ кН, соответствующее нагружению при разрушающем контроле. В результате расчётов получено НДС блокировочного кольца с учётом различной толщины напылённого слоя молибдена (рисунок 2, б), а также без напыления (рисунок 2, в)

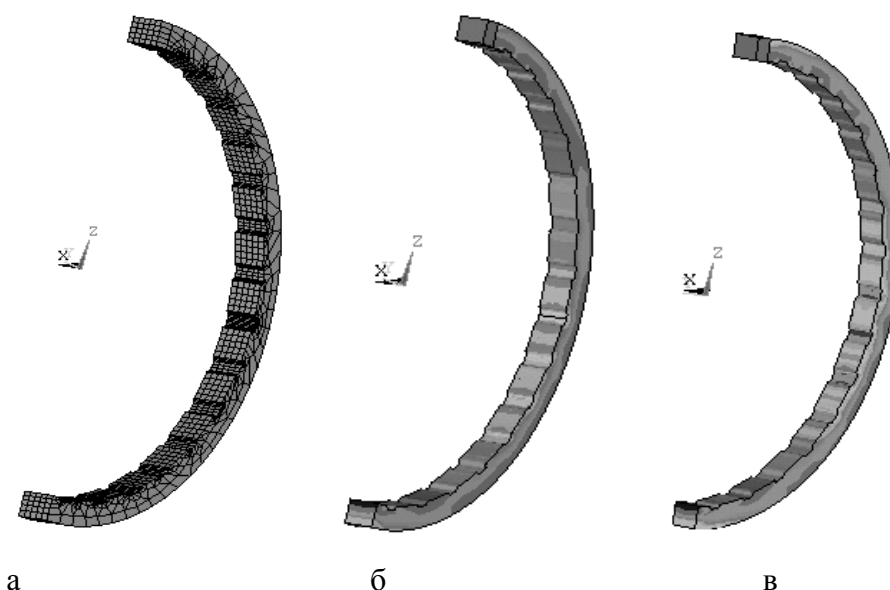


Рисунок 2 – Конечно-элементная модель и НДС
(а – модель, б – НДС с напылением, в – НДС без напыления)

В исследовании изучалось НДС детали с толщиной слоя напыления $t = 0,2-0,6$ мм. Результаты расчёта максимальных растягивающих напряжений σ_1 и пластических деформаций ε в области зарождения усталостных микротрещин приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчётов

№	Толщина напылённого слоя t , мм	Максимальные растягивающие напряжения σ_1 , МПа	Максимальные деформации в концентраторе напряжений, мм
1	0,6	682	0,0185
2	0,5	686	0,0197
3	0,4	691	0,0206
4	0,3	698	0,0216
5	0,2	704	0,0223
6	без молибдена	748	0,0301

Из представленных в таблице 1 данных видно, что газотермическое напыление молибдена позволяет снизить максимальные растягивающие напряжения в области зарождения усталостных микротрещин до 8,8 %, что соответствует толщине слоя напыления $t = 0,6$ мм. Упрочняемая поверхность после напыления подвергается чистовой обработке с припуском не менее 0,1 мм, а остаточная толщина молибденового слоя после механической обработки должна быть не менее 0,3 мм. В связи с этим можно сделать вывод о минимально допустимой толщине напыляемого слоя, равной 0,4 мм, что обеспечивает снижение растягивающих напряжений в концентраторах по сравнению с деталью без напыления на 7,6 %.

Таким образом, на основании проведённого исследования установлено:

- возможна корректировка режимов газотермического напыления молибдена, обеспечивающая минимально допустимую толщину слоя для блокировочного кольца не менее 0,4 мм, что приведёт к сокращению расхода молибденовой проволоки при сохранении требуемого уровня сопротивления усталости;
- разработанный подход позволяет с помощью программного комплекса ANSYS/LS-DYNA оценивать упрочнение методом напыления, учитывая только толщину слоя молибдена, что допускает минимизацию операций разрушающего контроля.