

УДК 621.771.07.001.5

С.С. Самотугин, профессор, д-р техн. наук,

В.А. Гагарин, инженер

Приазовский государственный технический университет

ул. Университетская 7, г. Мариуполь, Украина, 87548

E-mail: gagarin_v_a@ukr.net

Калиниченко В.И., ст. науч. сотрудник, канд. техн. наук

Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины

ул. Тимирязевская 2, Киев, Украина, 01014

E-mail: Kalinichenko_Vitalii@ukr.net

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В УПРОЧНЕННЫХ СЛОЯХ ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ

Рассматривается возможность оптимизация геометрии нанесения модифицированных покрытий с учетом влияния остаточных термических напряжений.

Ключевые слова: *градиентная структура, модифицированные покрытия, остаточные напряжения, конечные элементы, трибология.*

Одной из важнейших задач в современном производстве является повышение срока службы деталей. Основной причиной их выхода из строя является преждевременный износ контактирующих поверхностей. Особенно остро эта проблема ощущается в тяжело нагруженных деталях металлургических и машиностроительных предприятий. Таким образом, повышение триботехнических характеристик контактирующих поверхностей является актуальной задачей.

Традиционно, основным способом повышения износостойкости контактирующих поверхностей деталей машин, является увеличение твердости материалов. Это, в свою очередь ведет к охрупчиванию поверхности, что ведет к отслоениям и отколам в процессе эксплуатации.

Одним из наиболее эффективных способов повышения прочностных характеристик сталей является плазменная поверхностная модификация. Она позволяет получить большую величину модифицированной зоны (глубина до 5 мм, ширина до 10 мм) по сравнению с другими способами (лазерный, электронный луч и др.); отсутствует возможность отслоений как в случае нанесения наплавленных или напыленных покрытий; позволяет обрабатывать локальные участки деталей.

Использование плазменных источников нагрева позволяет получать модифицированные покрытия как сплошного, так и градиентного строения, в которых упрочненные (твердые и хрупкие) зоны чередуются с зонами, имеющими исходную структуру (мягкими и вязкими). Установлено [1, 2], что нанесение покрытий градиентного строения не только не снижает эксплуатационные характеристики поверхностного слоя, но и позволяет их повысить, за счет чередования твердых и вязких участков. Такое строение покрытий позволяет успешно бороться с хрупкостью, так как в этом случае возникающие трещины гасятся на границе зон с разной структурой и твердостью.

Известны преимущества [2] в период эксплуатации поверхностей, которые при механической обработке подверглись возникновению градиентных структур. В некоторых механизмах (гидроцилиндры и распределители, цилиндры двигателей, подшипники и др.) применяют поверхности с регулярно расположенными микроуглублениями. Неровности, образованные в период приработки сопряженных поверхностей, также повышают износостойкость поверхности. Подобные микроуглубления улучшают контактные свойства поверхности – улучшение смазываемости, повышение сопротивления схватываемости, удержанию продуктов износа, что снижает вероятность заклинивания пары трения. Гидравлические среды в подобных микроуглублениях могут воспринимать радиальную нагрузку, тем самым уменьшая контактные нагрузки в поверхностном слое металла. Циркулирующая в микроуглублениях смазка способствует теплоотводу из зоны контакта.

Модифицированные покрытия могут иметь как геометрию в виде сплошных прямолинейных полос, так и в виде отдельных окружностей, эллипсов или других форм, если между обрабатываемой поверхностью и плазмотроном расположить экран с соответствующими прорезями (рисунок 1). На свойства такого покрытия влияют размеры модифицированной зоны (ширина и глубина), расстояние между соседними зонами. В случае нанесения зон в виде сплошных линий имеет значение их угол наклона по отношению к направлению изнашивания и, соответственно, к направлению приложенных контактных нагрузок.

Правильно подобранная геометрия градиентного покрытия позволяет снизить опасное для деталей влияние остаточных напряжений возникающих вследствие значительного температурного воздействия при плазменной модификации в поверхностном слое обрабатываемой детали. Следовательно, для полного прогнозирования свойств модифицированной поверхности, а также для назначения режимов

обработки и геометрии градиентного покрытия необходимы модели, описывающие как влияние входных параметров обработки непосредственно на эксплуатационные характеристики детали, так и вносимые в ходе такой обработки напряжения и деформации.

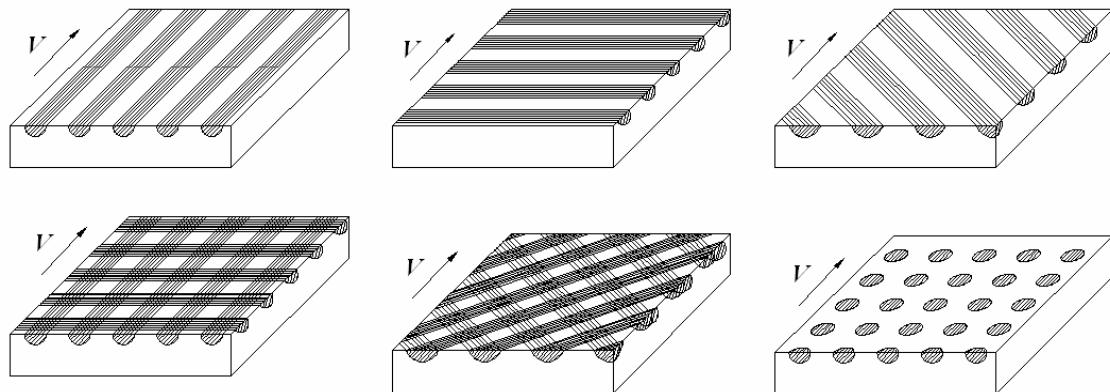


Рисунок 1 – Варианты геометрии градиентных плазменных покрытий (V – направление изнашивания)

В настоящее время механизмы образования и распределения остаточных напряжений в сталях при поверхностном упрочнении как с оплавлением, так и без оплавления поверхности достаточно хорошо изучены [3, 4]. Эксплуатационные свойства упрочненных инструментальных сталей, как отмечалось выше, будут в значительной степени зависеть от величины и знака внутренних микронапряжений.

В общем случае при поверхностной обработке сталей, остаточные макронапряжения являются алгебраической суммой напряжений двух видов – термических, вызванных неравномерным распределением температуры по сечению изделия, и структурных, связанных с изменением объема в результате фазовых переходов «жидкость $\leftrightarrow \gamma \leftrightarrow \alpha$ » [4]. Следует отметить, что в высокоуглеродистых сталях, в том числе инструментальных, знаки структурных и термических напряжений противоположны. Конечная величина результирующих остаточных напряжений зависит от состава стали, режима и технологии обработки. Установлено, что при обработке сталей мощной плазменной струей (30 кВт) без оплавления поверхности основной вклад в величину остаточных напряжений вносят термические напряжения, которые при поверхностном концентрированном нагреве являются однозначно сжимающими.

При нанесении на поверхности детали сплошного модифицированного плазменного покрытия, каждая последующая дорожка вносит дополнительные остаточные напряжения, которые суммируются с уже имевшимися в металле. В ранее нанесенной модифицированной зоне образуется небольшая (1-2 мм) зона отпуска. То есть, помимо уменьшения прочности покрытия, до 20 % обработанной поверхности теряют полученные свойства. Следовательно, рационально оставлять минимальный зазор между наносимыми модифицированными зонами.

Лабораторные испытания на установке для абразивного изнашивания показывают, что наименьшему износу образцы из стали 45 и 90ХФ подвержены при зазоре между модифицированными зонами 50-60 % от ширины упрочненной зоны в зависимости от ширины зоны и нагрузки (таблица 1).

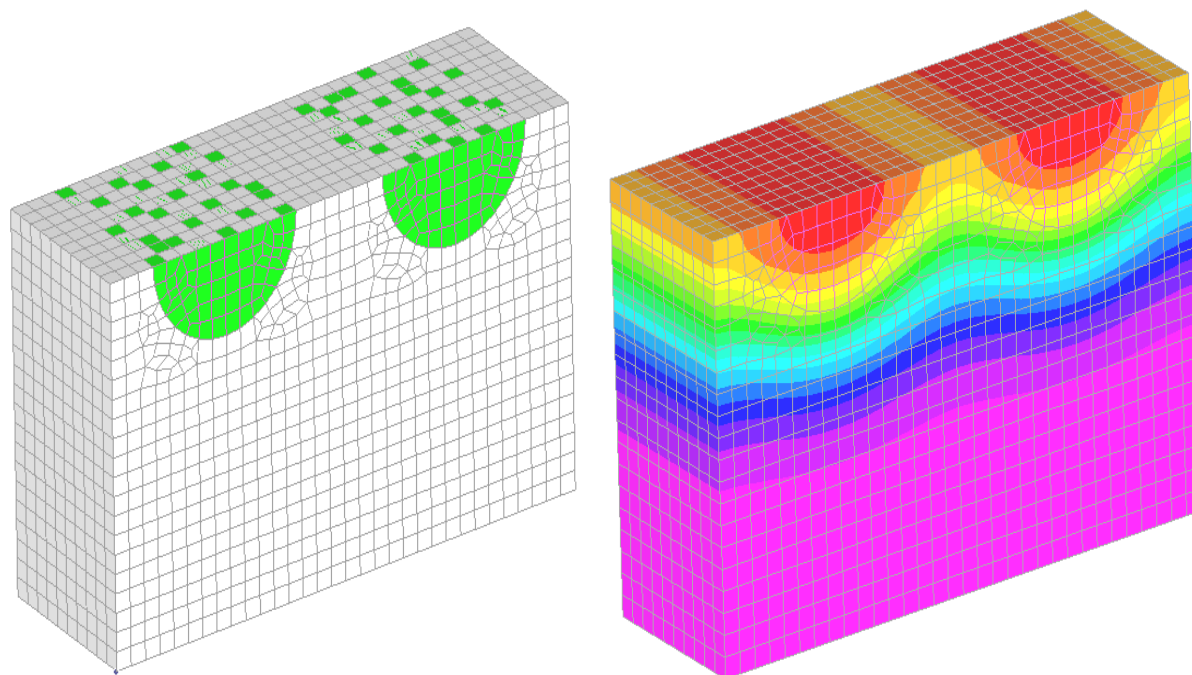
Таблица 1 – Износостойкость стали 90ХФ при различных вариантах обработки

Вариант обработки	Зазор между зонами, мм	Коэффициент износостойкости, K_i
Без обработки	–	1
Плазменная модификация	0	4,17
	2	4,36
	4	4,85
	6	4,91
	8	4,56
Объемная закалка	-	2,76
Объемная закалка +Плазменная модификация	0	4,95
	2	5,31
	4	5,78
	6	5,86
	8	5,45

Вследствие того, что в зависимости от условий эксплуатации на конкретной поверхности могут требоваться различные значения твердости поверхностного слоя, возможно изменение оптимального значения зазора между зонами. Также он будет различным для сталей с различным содержанием углерода и легирующих элементов. В виду многофакторности процесса, в литературе отсутствуют четкие рекомендации по выбору режимов обработки в совокупности с геометрией покрытий.

Данную задачу целесообразно решать используя метод конечных элементов (МКЭ), который широко используется при силовых и динамических расчетах механизмов, но ввиду своей сложности, меньше применяется для термодинамических расчетов.

Нами была построена конечно-элементная модель детали подвергнутой плазменной поверхностной модификации (рисунок 2). Расчеты напряженно-деформированного состояния осуществлялись в лицензионном комплексе MSC Visual Nastran for Windows.



а) б)
Рисунок 2 – Конечно-элементная модель образца с модифицированными зонами (а) и распределение температур в образце при плазменной модификации

Решение задачи с помощью МКЭ состоит из 3-х этапов: создание модели, разбиение ее на конечные элементы, приложение нагрузок и ограничений, расчет, анализ рассчитанных параметров и выбор оптимального способа их отображения. При построении данной модели, сечение модифицированной зоны получали максимально приближенным к реальному. Разбиение производили при помощи гексагональных элементов. Нагрузки прилагали в виде нестационарного конвекционного потока, в котором изменение температуры задано в виде функции от времени $T(t)$. После расчет температурных полей (рисунок 2, б) и анализа результатов, был выбран режим, для которого рассчитывались остаточные температурные напряжения (рисунок 3).

Расчеты показали, что максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу наблюдаются в переходной зоне между модифицированным и основным металлом. Данная модель позволяет не только определить значения напряжений на поверхности покрытия, но и отображает эпюры напряжений любой точки модифицированной зоны и всей модели.

После расчета остаточных напряжений к модели была приложена контактная нагрузка и получены поля суммарных напряжений (рисунок 4). Сравнение пространственных эпюр распределения напряжений показывает, что под нагрузкой поля напряжений компенсируются и поверхностный слой находится в благоприятных условиях эксплуатации.

Известно, что наибольшему износу подвержены участки с максимальными напряжениями. Исходя из результатов построенных эпюр можно с прогнозировать, что износ такой поверхности будет равномерным, а учитывая высокую твердость модифицированных зон – крайне низким.

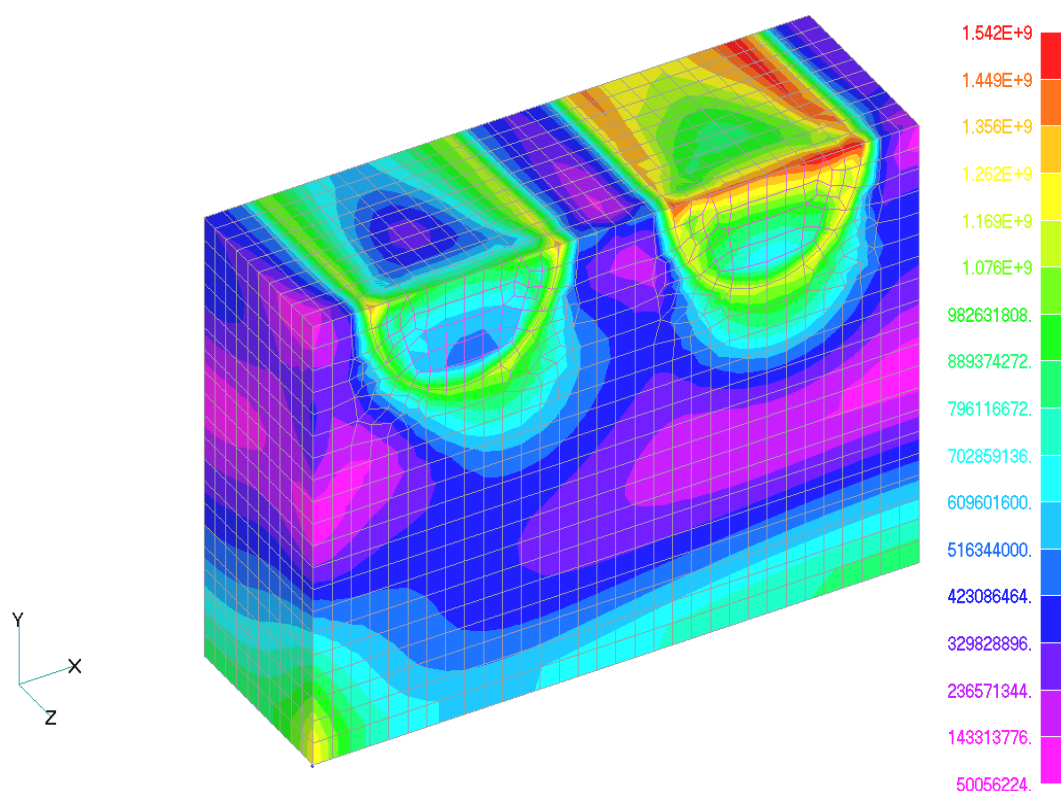


Рисунок 3 – Распределение остаточных напряжений в стали 45 после плазменной поверхностной модификации

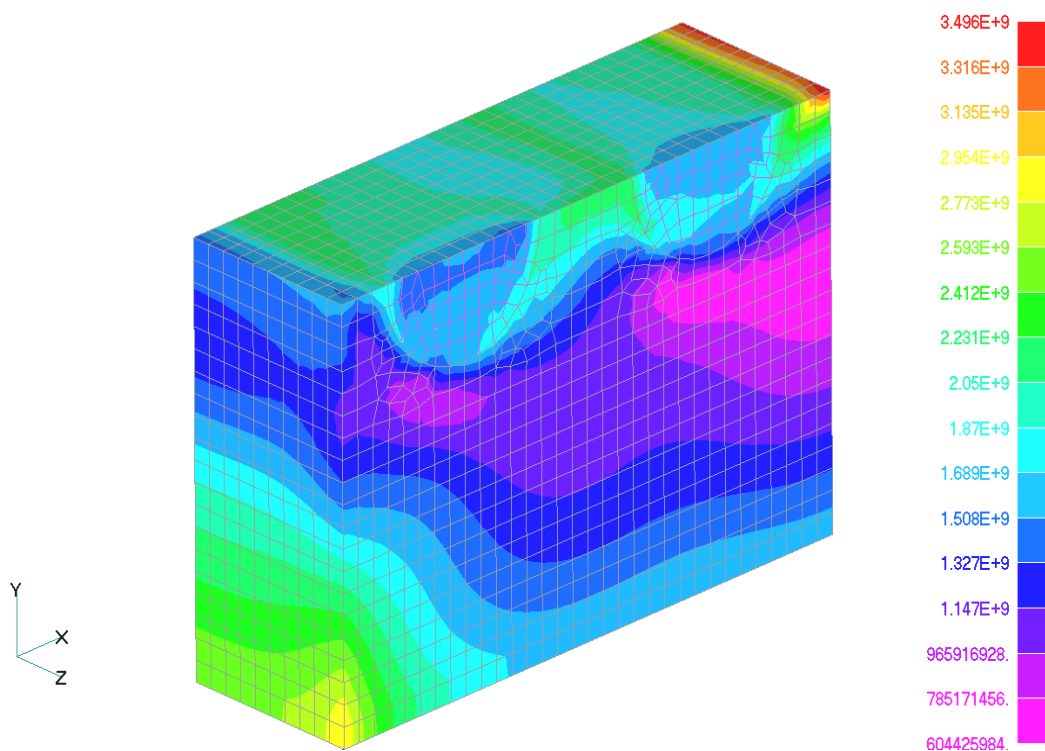


Рисунок 4 – Распределение напряжений при сочетании контактной нагрузки и остаточных напряжений в стали 45 после плазменной поверхностной модификации

Таким образом, мы можем оптимизировать технологию нанесения модифицированных плазменных покрытий, основываясь на данных моделирования методом конечных элементов. Используя полученные данные становится возможным выбирать оптимальные конструкции градиентных покрытий с наиболее высокими эксплуатационными показателями.

Библиографический список использованной литературы

1. Расчетная оценка напряженного состояния покрытий дискретного строения на высокопрочном чугуна/ Б.А. Ляшенко [и др.] // Защита металлургических машин от поломок. — 2006. — № 9. — С. 221–225.
2. Ляшенко Б.А.. Упрочнение поверхности металлов покрытиями дискретной структуры с повышенной адгезионной и когезионной стойкостью / Б.А. Ляшенко, Ю.А. Кузема, М.С. Дигам. — К.: Ин-т проблем прочности НАН Украины, 1984. — 57 с.
3. Григорьянц А.Г. Методы поверхностной лазерной обработки / А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов. — М.: Высшая школа, 1987. — 191 с.
4. Самотугин С.С. Остаточные напряжения в инструментальных сталях после плазменного упрочнения с оплавлением поверхности / С.С. Самотугин, В.А. Мазур // Сварочное производство. — 2006. — № 8. — С. 20–26.

Поступила в редакцию 1.04.2011 г.

Самотугін С.С., Гагарін В.О., Калініченко В.І. Моделювання напруженого стану в зміцнених шарах при плазмовій поверхневій обробці

Розглядається можливість оптимізації геометрії нанесення модифікованих покриттів з урахуванням впливу залишкової термічної напруги.

Ключові слова: градієнтна структура, модифіковані покриття, залишкова напруга, кінцеві елементи, трибологія.

Samotugin S.S., Gagarin V.A., Kalinichenko V.I. Modeling the tense state in the hardened layers at plasma surface processing

The possibility to optimize the geometry of modified covering taking into account the influences of the remaining thermal tensions is considered.

Keywords: gradient structure, modified coverage, remaining tensions, eventual elements, tribology.