

УДК 621.373.826

В. И. Шагин, кандидат технических наук, доцент, Сибирская академия права, экономики и управления, Иркутск

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ТЯГОВЫХ ПРИВОДОВ ЛОКОМОТИВА НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ

Поверхностное лазерное модифицирование металлов и сплавов относится к локальным методам термического воздействия на материалы и предусматривает использование таких перспективных технологических процессов, как закалка, наплавка и легирование. В статье рассматриваются технологии термоупрочнения и наплавки зубчатых передач, позволяющие повысить износостойкость, увеличивая при этом их работоспособность и эксплуатационную надежность.

Ключевые слова: лазерная технология, модифицирование поверхностей, восстановление поверхностей.

Наиболее важным фактором повышения надежности изделий машиностроения, является снижение износа поверхностных слоев, в том числе шестеренчатых передач. Лазерное модифицирование поверхностей пар трения является одним из наиболее перспективных методов повышения их триботехнических свойств. К методам поверхностного лазерного модифицирования относятся закалка, наплавка и легирование [1, 2, 3]. На сегодняшний день отечественными и зарубежными учеными выполнен большой цикл исследований по лазерному модифицированию поверхностей металлов; разработан ряд технологических процессов по восстановлению деталей морских судов и авиатехники, восстановления и упрочнения деталей трансмиссии различных видов транспорта; созданы новые композиционные, высокопрочные, толстолистовые материалы с гетерогенным поверхностным слоем толщиной до 10...20 мм, с повышенной противударной стойкостью [4, 5, 6]. Большую перспективу имеют технологии лазерной закалки из расплава для получения уникальных структурных превращений в зоне термического влияния для сталей 20; 45; 40Х; 38ХМН, 40ХН2МА; 20Х13; 40Х13; Х18 Н9Т; У10; 9ХНФ и др., бронз Бр ФЖНМу Э-4-4-1, БрАМу У-2, БрОЦ10-2, а также ряда алюминиевых, титановых сплавов и других материалов [1]. В упомянутых научных направлениях принимают участие ученые ведущих НИИ, вузов и предприятий России, таких как МГТУ им. Баумана, ИПЛИТ РАН, ИЭС им. Е. О. Патона и др.

В настоящей работе представлены результаты исследований лазерного модифицирования поверхности зубьев шестерен и зубчатых колес тягового привода локомотива. Рассматриваются технологии термоупрочнения и восстановления методом наплавки самофлюсующихся твердосплавных порошковых материалов, обладающих высокой износостойкостью, в частности стали 20ХМА, из которой изготавливается шестерня редуктора тягового привода локомотива и сталь 55Ф зубчатого колеса привода. Упомянутые стали обрабатываются с большим трудом, и информация к данным видам обработки весьма ограничена.

Износ этих сопрягаемых пар обусловлен, с одной стороны, абразивным и ударно-усталостным изнашиванием, с другой – коррозионными (окислительными) процессами, что собственно и определяет ресурс этих пар. На одном локомотиве устанавливается до 16 зубчатых пар. Расходы на ремонт одного колеса составляют свыше 100 тыс. руб., а приводной шестерни около 30 тыс. руб. В этой связи актуальность решения этой проблемы очевидна. Известно, что процесс изнашивания зависит от целого ряда факторов: сочетания физико-механических свойств трущихся пар, шероховатости контактирующих поверхностей и их твердости, скорости и характера трения, удельных давлений, условий эксплуатации, обусловленных смазкой и температурными режимами, и т. д.

Учитывая имеющийся отечественный и зарубежный опыт, а также результаты изучения влияния лазерного модифицирования на износостойкость материалов [2, 4, 7], технологические процессы, предлагаемые в настоящей работе, могут обеспечить существенный экономический эффект и увеличение надежности подвижного состава. Известно, что кроме снижения интенсивности изнашивания, как в условиях сухого трения, так и в абразивно-масляной среде, при лазерном термоупрочнении для большинства сталей наблюдается снижение коэффициента трения примерно в 2 раза [5]. При этом наблюдается повышение износостойкости не только упрочненной детали, но и детали сопряженной с ней. На рис. 1 представлены зависимости скорости изнашивания и коэффициента трения стали 40Х, обработанной лазером и закаленной по стандартной методике.

Кроме этого особенностью поверхностей трения, подвергнутых лазерному модифицированию, является то, что после обработки они не имеют сетки микротрещин, характерных для сталей, закаленных традиционным способом. Это особенно важно для зубчатых передач, так как они являются концентраторами напряжений, имеющих место в рассматриваемой паре; известно также, что при взаимной лазерной обработке сопрягаемых пар [6] показатели изнашивания для ряда сталей заметно возрастают. При этом, очевидно, проявляется (в порядке обсуж-

дения) некий эффект «технологической преемственности», как при лазерной термообработке, так и при наплавке присадочными порошковыми самофлюсующимися материалами. Концепция технологических и технико-экономических аспектов комплексного подхода [8] подтверждает целесообразность и эффективность промышленного использования того и другого способов лазерного модифицирования на разных этапах эксплуатации изделия. Лазерная наплавка представляется целесообразной на этапе восстановительного ремонта техники, а лазерная закалка в межремонтный промежуток эксплуатации. Одновременно с этим, используя то же технологическое лазерное оборудование, с незначительной корректировкой режимов обработки, возможно проведение операции сварки образовавшихся микротрещин, как в зубчатом колесе, так и в шестерне, а также локализации концентраторов напряжения в зонах микротрещин путем их оплавления в пределах допусков, предусмотренных технологией ремонта.

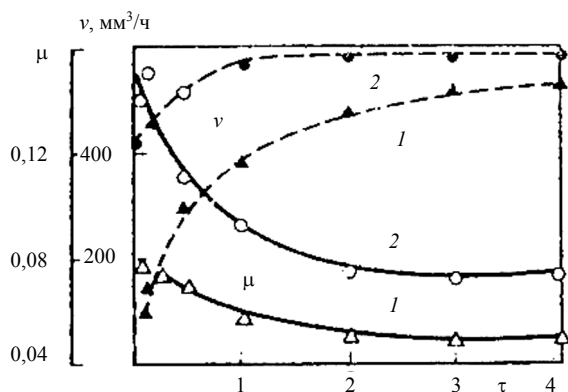


Рис. 1. Зависимость скорости изнашивания и коэффициента трения стали 40X, упрочненной лазером (1) и закаленной стандартным способом (2)

В этой связи наиболее предпочтительным и экономически целесообразным в данном случае может оказаться использование технологии лазерного термоупрочнения той и другой сопрягаемой пары трения, как деталей 1-й категории, так и на ранней стадии эксплуатации, реализуемой, например, в период технического обслуживания в условиях ремонтного локомотивного депо.

Известно, что влияние лазерного модифицирования на износостойкость материалов связано со спецификой, образующейся в поверхностном слое структуры: ее высокой дисперсностью, пониженной химической активностью, высокой микротвердостью и повышенной коррозионной стойкостью. Вероятно, благодаря этому при лазерном термоупрочнении рост показателя микротвердости не снижает уровень износа, а в большинстве случаев увеличивает его, особенно при взаимной обработке сопрягаемых пар трения [6].

Примем во внимание, что триботехнические характеристики поверхностей в обычных условиях, в частности при увеличении показателя твердости,

не всегда является фактором, определяющим их сопротивление износу.

Это обстоятельство еще раз косвенно подтверждает эффект «лазерной технологической преемственности».

Кроме структурных превращений в большинстве сталей при лазерном термоупрочнении имеет место изменение фазового состава [3]. Структура (ЗТВ) большинства сталей от воздействия лазерного луча чаще состоит из двух слоев. Первый содержит мелкодисперсный мартенсит и остаточный аустенит. В сталях с малым содержанием углерода, например Ст20, на дифрактограмме не обнаруживается дифракционный минимум, соответствующий γ -аустениту. Второй слой как правило является переходным от первого слоя к исходному материалу. Его структура зависит от марки стали. Так, в сталях 20 и 45 его структура состоит из зерен феррита и мартенсита, образовавшегося на месте перлитных зерен, а в стали У8 — из мартенсита.

Наибольшее внимание в работе было уделено изучению свойств и технологических особенностей обработки зубчатого колеса тягового привода, изготовленного из ванадиевой стали 55Ф как наименее изученной по отношению к предлагаемым видам модифицирования и наиболее дорогостоящей в изготовлении и восстановительном ремонте.

Лазерное модифицирование осуществлялось по двум видам обработки — термоупрочнение и наплавка — с использованием импульсного твердотельного оптического квантового генератора «Квант-15» с энергией импульса 8 Дж, длиной волны 1,06 мкм, длительностью импульса 4 мс. Плотность энергии излучения вибрировалась степенью дефокусировки (смещением поверхности детали относительно фокуса линзы). Обработка образцов осуществлялась в воздушной среде.

При наплавке в качестве присадочного материала использовались сплавы системы Ni-Cr-B-Si, которые выгодно отличают их от других порошковых материалов, в частности ПГ-ХН80СР 20М. Важным технологическим свойством этих сплавов является их способность самофлюсования в процессе наплавки, заключающаяся в образовании при окислении бора и кремния при высокой температуре стекловидного шлакового покрытия, позволяющего защитить расплав от взаимодействия с атмосферным азотом и кислородом. Кроме того, они способны растворять окисную пленку на поверхности основы металла, при этом хорошо смачивая ее. Благодаря относительно низкой температуре плавления (960–1000 °С) уменьшается глубина подплавления подложки.

При использовании для наплавки порошков этой системы лазерным источником энергии их износостойкость более чем в 10 раз превосходит этот показатель, получаемый наплавкой ТВЧ [5] методом «намораживания», и в 3...5 раз плазменно-напыленных покрытий с последующим газопламенным оплавлением. При этом наряду с образованием мелкодисперсной структуры изменяются условия кристаллизации.

Линейный анализ, проведенный в МГТУ им. Баумана с помощью рентгеноспектрального микроанализатора, показал сравнительно однородное распределение бора по высоте наплавленного слоя (рис. 2.) Понижение содержания бора в верхней части слоя, по-видимому, связано с его участием при образовании стекловидного шлака. Локальное увеличение содержания бора приходится на эвтектическую составляющую структуры. Наличие некоторого количества бора в основе металла на линии сплавления связано, очевидно, с процессами диффузии.

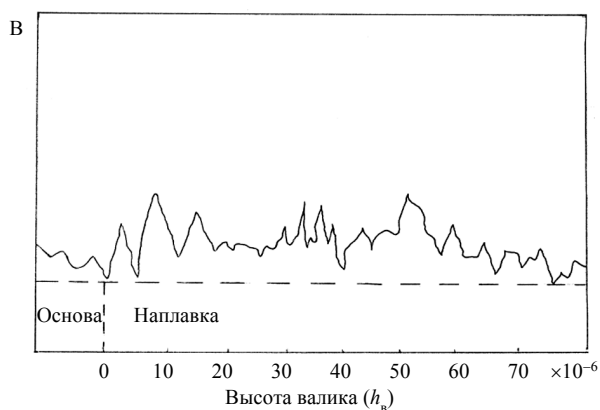


Рис. 2. Изменение содержания бора (В) по высоте при лазерной наплавке порошком состава ПГ-ХН80СР 30М

Структура и фазовый состав, закристаллизовавшегося металла определяется его химическим составом и способом обработки, который характеризуется технологическими параметрами процесса, а также скоростями охлаждения.

Высокие скорости нагрева и охлаждения (порядка нескольких тысяч градусов в секунду), свойственные лазерной обработке, более чем на порядок превосходят скорости при индукционной наплавке, поэтому процесс затвердевания металла наплавки можно охарактеризовать как закалку из жидкого состояния, при которой образование пересыщенных твердых растворов [9] способствует сдвигу кристаллических точек равновесных диаграмм состояния сплавов [4], изменению структурных составляющих и химического состава некоторых из них.

Подавление прессы диффузии с увеличением скорости охлаждения приводит к частичному или полному исключению образования отдельных фаз в многофазной структуре. Так, при равновесных условиях кристаллизации сплавов системы Ni-Cr-B-Si образуется 3-фазная структура, состоящая из γ -твердого раствора на основе никеля, сложной эвтектики типа (Ni+Ni₃B) и кристаллических образований различной формы и размеров, среди которых можно выделить карбиды хрома Cr₂₃C₂, бориды хрома CrB и Cr₂B₄ и сложные соединения типа карбоборидов Me₂₃(CB)₆, Cr₂(BC). По данным [10], после лазерной наплавки аналогичного сплава в результате изменения механизма затвердевания в условиях высоких скоростей охлаждения происходит образование ква-

зиэвтектической структуры: сильно пересыщенного γ -твердого раствора и фазы Ni₃B размером $5 \cdot 10^{-6}$ м. Образование карбидных фаз, например Cr₅B₃, полностью подавляется, при этом происходит пресыщение γ -твердого раствора, приводящее к увеличению параметров его кристаллической решетки по сравнению с параметрами решетки чистого никеля.

Исследования показали, что металл наплавки восстановленных деталей имеет аналогичный структурный и фазовый состав. Толщина наплавленного слоя при использовании технологического CO₂ – лазера непрерывного режима излучения мощностью 800–1000 Вт – может достигать 0,5...0,7 мм, протяженность зоны термического влияния составляет 0,5...0,7.

Внешний вид слоя стали 55Ф, наплавленного на лазерной установке «Квант-15», приведен на рис. 3.

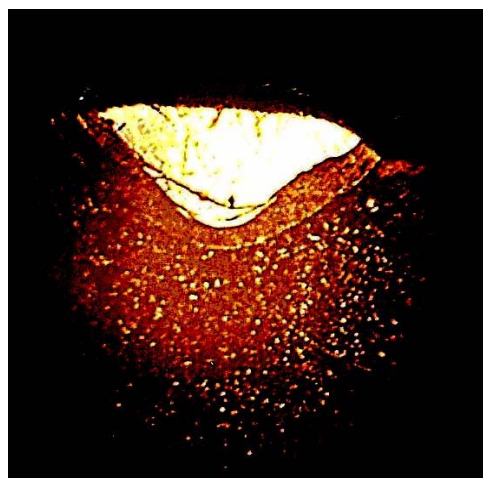


Рис. 3. Внешний вид наплавки от воздействия одиночного импульса

Светлый слой характеризует структуру присадочного материала, более темный – ЗТВ. Переходные зоны между этими слоями и структурой основы металла имеют четко видимые границы. Показатель их микротвердости изменяется в пределах: светлый (наплавка) – 500...650 единиц по HV, слой ЗТВ – 750...1000, основы (исходный металл сталь 55Ф) – 340...360. Структура наплавки дендритная (рис. 4). Дендриты ориентированы в направлении максимального теплоотвода. Слой ЗТВ имеет укрупненные кристаллы упрочняющей фазы мартенсита. Характер структур в значительной мере определяется распределением температур и скоростей охлаждения. Судя по размерам кристаллов, скорость охлаждения максимальна в поверхностном слое, где находится расплав, и составляет $5 \cdot 10^{-4} \dots 10^5$ °C/c [5]. По мере удаления от поверхности температурный градиент снижается, что обуславливает структурные изменения в твердом состоянии, а именно распад метастабильных фаз. Аналогичные изменения наблюдаются в покрытиях, содержащих светлые слои, при высокотемпературном отжиге в вакууме или среде инертного газа.

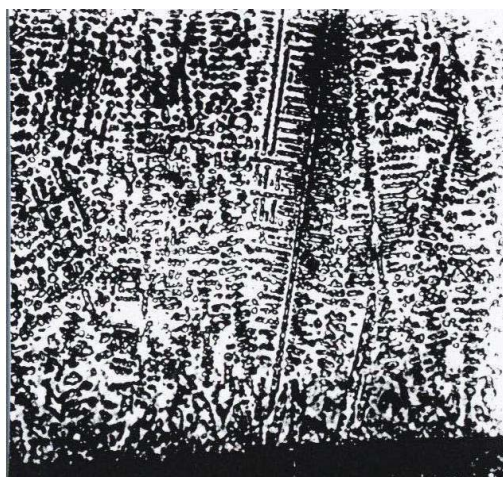


Рис. 4. Структура сплавов системы Ni-Cr-B-Si после лазерной наплавки

Подобные структурные изменения происходят в ЗТВ при лазерном термоупрочнении стали 55Ф, при этом распад метастабильных фаз происходит с большей скоростью на значительно большую глубину – 0,7...0,8 мм.

Неожиданным для этой стали является тот факт, что для большинства изученных в этом направлении сталей, таких как ст20; 30; 45; У8; У12, ХВГ, Х12М и т. д., показатель микротвердости наибольшее значение имеет в поверхностной зоне, а наименьшее – в переходной. На рис. 5 показан график зависимости микротвердости от глубины ЗТВ.

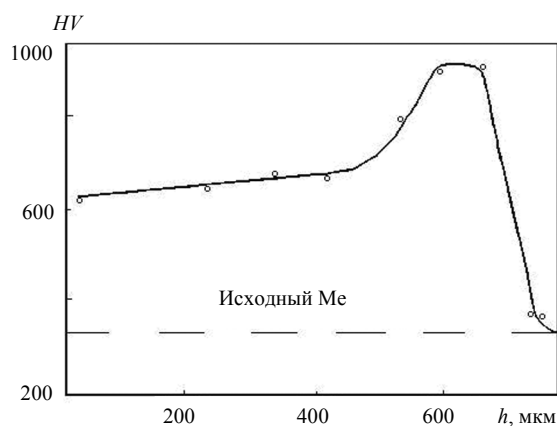


Рис. 5. График зависимости микротвердости HV по глубине ЗТВ

В данном случае этот показатель постоянно растет и резко снижается до величины исходного на границе раздела структурных преобразований. Данное явление предполагает более глубокое изучение, однако трибомеханические свойства модифицированного слоя могут иметь весьма положительный прогноз. Во-первых, поверхностный износостойчивый, но более мягкий слой может быть наиболее легко адаптирован на этапе приработки, который может составлять до 40 % от допустимого износа. Во-вторых, в процессе изнашивания последующие слои

ЗТВ благодаря повышенной твердости и низкому коэффициенту трения способны обладать более высокими износостойчивыми антифрикционными свойствами, достигая максимального значения триботехнических показателей на границе раздела структурных преобразований.

Аналогичный механизм изнашивания можно прогнозировать и для модифицированных поверхностей трения методом лазерной наплавки, учитывая их более высокие параметры износостойкости и прочность сцепления их с основной материала за счет подплавления и перемешивания с основной металла [1].

Необходимо иметь в виду, что увеличение подплавления приводит к возрастанию прочности сцепления наплавленного слоя с основой, но при этом возрастает доля материала основы за счет перемешивания в объеме наплавки, в результате чего могут ухудшиться свойства наплавленного слоя. Поэтому для достижения высокого качества наплавки необходимо регламентировать коэффициент перемешивания $\gamma = 5...15\%$ [1], который определяется по формуле $\gamma = [S_o / (S_n + S_o)] \cdot 100$, где S_o – площадь подплавленного слоя основы в сечении одиночного валика; S_n – площадь наплавленного слоя. Это легко достигается регулировкой плотности мощности излучения и скорости наплавки.

Принимая во внимание вышеизложенное, а также целесообразность взаимной обработки пары «шестерня – зубчатое колесо», на различных этапах эксплуатации тягового привода можно, по мнению авторов, увеличить их износостойкость в 7 и более раз, что значительно повысит ресурс и надежность тягового привода, а также снизит эксплуатационные затраты.

Список литературы

1. Григорьянц А. Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
2. Влияние лазерной обработки на изнашивание деталей в абразивно-масляной среде / В. М. Голубец [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 1972. – № 4. – С. 114–115.
3. Коваленко В. С., Черненко В. С. Исследование процесса получения микроотверстий фотонным лучом ОКГ // Технология и автоматизация машиностроения. – 1968. – Вып. 5. – С. 26–32.
4. Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Кокора А. Н. Лазерная обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1975. – 296 с.
5. Коваленко В. С., Верхотуров А. Д., Головкин Л. Ф. Лазерное и электроэрозионное упрочнение материалов. – М.: Наука, 1986. – 276 с.
6. Шастин В. И. Лазерная обработка сопрягаемых пар трения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Вып. 4(24). – Иркутск, 2009. – С. 202–207.
7. Влияние модифицирования и обработки поверхностей стали ШХ15 лазерным излучением на трение по твердому сплаву / Власов Е. М. [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 1976. – № 1. – С. 156–159.
8. Шастин В. И. Современное состояние и перспективы промышленного использования лазерных технологий в машиностроении // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Вып. 4(20). – Иркутск, 2008.

9. Бураков В. А., Барышевская Е. А., Буранова Н. Локальная цементация железа в условиях импульсного лазерного нагрева и скоростной закалки // Известия вузов. Машиностроение. – 1981. – № 11. – С. 28–31.

10. Влияние некоторых технологических факторов на особенности формирования валков при лазерной газопорошковой наплавке / Григорьянц А. Г. [и др.] // Порошковая металлургия. – 1984. – № 9. – С. 39–42.

V. I. Shastin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Siberian Academy of Law, Economics and Management, Irkutsk

Refacing of Locomotive Tractive Gearing on the Basis of Laser Modification

Surface engineering with a laser of metals and alloys refers to local methods of thermal influence on materials and provides use of such perspective technological processes as heat strengthening, welding and doping. Thermostrengthening and built-up welding of gears allowing to increase their wear resistance, working capacity and maintainability are considered.

Key words: laser technology, surface modification, refacing.

УДК 621-752

С. В. Елисеев, доктор технических наук, профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения

УПРУГИЕ ЭЛЕМЕНТЫ В СТРУКТУРНОЙ ТЕОРИИ ВИБРОЗАЩИТНЫХ СИСТЕМ

Рассматриваются возможности нетрадиционного представления управления движением по принципу относительного отклонения. Предложена математическая модель обобщенных упругих элементов колебательных структур, имеющих дополнительные связи с независимыми движениями.

Ключевые слова: виброзащитная система, приведенная жесткость, обобщенная пружина, передаточная функция, «скрытые» силы.

Расчетные схемы современных машин в задачах защиты от вибрации могут быть представлены механическими колебательными системами, состоящими из элементарных звеньев расширенного набора. Такая система включает в свой состав не только традиционные массоинерционные, упругие и диссипативные, но и другие, которые соответствуют в системах автоматического управления дифференцирующим звеньям второго порядка, интегрирующим звеньям первого и второго порядков. Важным обстоятельством является то, что расширенный набор типовых элементов может быть использован для синтеза структур или блоков, которые реализуются в виброзащитной системе как дополнительные связи, принимающие, в том числе, и форму механических цепей [1].

Поскольку базовым элементом расчетной схемы в виде соответствующей структурной схемы эквивалентной в динамическом отношении системе автоматического управления (САУ) является объект, обладающий массой, то дополнительная связь, в физическом смысле, представляет собой сложную пружину или упругий элемент со свойствами, зависящими достаточно сложным образом от частоты [2].

Оценка динамических свойств виброзащитных систем производится с использованием передаточных функций, достаточное разнообразие которых отражает различные реакции системы на силовые и кинематические внешние воздействия.

При построении передаточных функций ВЗС, которые являются носителями информации о динамических свойствах систем в целом, было бы целесооб-

разно остановиться на знаменателе передаточной функции и рациональном выборе систем координат в оценке динамических свойств системы.

Рассмотрим в связи с этим простейшую модель виброзащитной системы (ВЗС) в виде системы с одной степенью свободы (рис. 1, а, б).

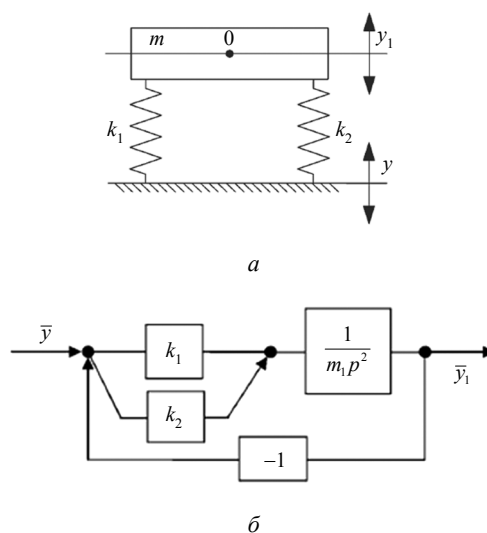


Рис. 1. Структурная схема (а) и структурная схема виброзащитной системы (б) при кинематическом возмущении у

Запишем выражения для кинетической и потенциальной энергии:

$$T = \frac{1}{2} m y_1^2; \tag{1}$$