

УДК 621.43

СОЗДАНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ГИЛЬЗЫ ЦИЛИНДРА С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В.В. КОСТРИЦКИЙ; канд. техн. наук, доц. **А.Л. ЛИСОВСКИЙ**;
канд. техн. наук, доц. **А.В. ДУДАН**
(Полоцкий государственный университет)

Определены с точки зрения максимизации гидродинамической несущей способности шаго-высотные параметры микрорельефа, которые могут обеспечить минимальную, но достаточную ширину зазора в сопряжениях цилиндропоршневой группы для обеспечения жидкостного трения. Исследованы тепловые процессы лазерной обработки, установлены закономерности между параметрами микрорельефа и режимами лазерной обработки. В результате проведенных исследований разработан способ образования микрорельефа на внутренней поверхности гильзы, который включает оплавление выступов поверхности лазерным излучением с последующим хонингованием выступов микрорельефа до необходимой высоты.

Введение. Повышение износостойкости трущейся поверхности гильзы цилиндров является актуальной проблемой в автомобильном двигателестроении. Основным подходом решения данной задачи на современном этапе развития двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является конструктивный подход, а в его рамках профилирование внутренней поверхности гильзы [1]. Однако из-за особенности кинематики цилиндропоршневой группы (ЦПГ) в зонах, где скорость поршня равна нулю (в так называемых мертвых точках), этот метод по снижению трения малоэффективен. Поверхностный слой этих зон помимо механической обработки поверхности до шероховатости $Ra = 0,32 \dots 0,08$ мкм должен обладать существенно улучшенными основными технологическими свойствами: твердостью, износостойкостью, теплостойкостью. Улучшение всех перечисленных свойств может быть достигнуто только одним из известных технологических приёмов, а именно упрочнением поверхностного слоя гильзы цилиндра за счёт изменения его химического состава или структуры. Установлено, что перспективным направлением в решении данной проблемы является применение лазерной обработки. Обработка лазерным излучением внутренней поверхности гильзы известна достаточно давно, однако применялась только в качестве упрочнения поверхностного слоя.

В данной работе лазерную обработку рассматриваем в рамках комплексного подхода, который позволяет создать на зеркале гильзы зоны с различными необходимыми параметрами микрорельефа путем оплавления поверхности, при этом обеспечивая необходимые механические свойства рабочей поверхности гильзы. Кроме того, геометрия лазерного луча легко изменяется оптическими системами, обработку внутренней поверхности гильзы можно вести при малом времени теплового воздействия, а значит, и минимальном короблении деталей. Это приводит к экономии энергии, материальных и трудовых ресурсов.

Микропрофилирование внутренней поверхности гильзы. Главной особенностью кинематики ЦПГ можно считать реверсивный характер и синусоидальное изменение скорости движения поршня и поршневых колец относительно цилиндра (с достижением максимума примерно в середине хода поршня и нуля в мертвых точках), поэтому основные детали ЦПГ – цилиндр, поршень и поршневые кольца – работают в режиме трения, представляющем собой изменяющуюся комбинацию гидродинамического, смешанного и граничного трения. Приведенные в работе [2] данные для автомобильного дизеля позволяют составить представление о доле каждого из названных режимов трения в течение рабочего цикла ДВС (табл. 1).

Таблица 1

Доли различных режимов трения элементов цилиндропоршневой группы автомобильного дизеля 8Ч 11/11,5

Элементы ЦПГ	Доля режима трения по отношению ко времени рабочего цикла, %		
	гидродинамический	смешанный	граничный
Поршень	52	39	9
Кольца	29	9	62

При прочих равных условиях в гидродинамическом режиме сила трения приблизительно на два порядка меньше сил граничного и сухого трения. Поэтому основной задачей профилирования является возможность обеспечения гидродинамического (жидкостного) трения на всем пути движения поршня.

О режиме жидкостного трения можно говорить, когда движущиеся поверхности полностью разделены пленкой смазки и непосредственный контакт элементов пары трения отсутствует. Пока такая плен-

ка цела, материал движущихся поверхностей и их шероховатость не имеют значения. Поэтому от микро-рельефа на внутренней поверхности гильзы требуется, чтобы эта пленка сохранялась на всем пути движения поршня, как бы прилипла к внутренней поверхности гильзы, то есть чтобы не было проскальзывания смазки относительно поверхностей.

Можно предположить, что рассмотренные процессы образования несущего масляного слоя в сопряжениях «поршневое кольцо – цилиндр» и «поршень – цилиндр» аналогичны гидродинамическим процессам, возникающим в гидродинамических многоклиновых подшипниках скольжения, где профиль вкладыша или вала имеет форму, отличающуюся от цилиндрической.

Исходя из этого предположения, можно сделать вывод, что обеспечить жидкостное трение в сопряжениях ЦПГ возможно созданием профилированного несущего масляного клина, путем обработки профиля поверхности по математически заданной кривой. Тогда и из решения уравнения Рейнольдса для плоского потока жидкости можно получить выражение для подъемной силы или реакции смазочного материала в зазоре смазываемых деталей сопряжений ЦПГ [3]:

$$P = \mu v \frac{L^2 (H_2 - H_1)}{2H_1^3}. \quad (1)$$

В формуле (1) такие параметры, как μ (коэффициент вязкости, Па·с) и v (скорость движения поршня, м/с), известны из условия работы двигателя и зависят только от его характеристик. Реакция смазочного материала P (Н) равна силе давления поршня во время работы двигателя на стенку гильзы цилиндра. Следовательно, лишь входная H_1 (мм) и выходная H_2 (мм) ширина зазора на шаге L (мм) характеризуют профиль регулярных выступов микро-рельефа, именно их сочетание и численные значения и определяют профилирование. А с учетом того, что выражение $(H_2 - H_1)/H_1$ является относительным перепадом высот δ , выражение (1) можно представить в виде

$$P = \mu v \frac{L^2}{H_1^2} \cdot \frac{\delta}{2}, \quad (2)$$

поэтому расчетная схема (рис. 1) является достаточно простой и может быть представлена в виде горизонтальной плоскости (поршень), движущейся на слое жидкости вдоль наклонной плоскости (цилиндр). Таким образом, получаем сопряжение «поршень – цилиндр с пилообразным микро-рельефом».

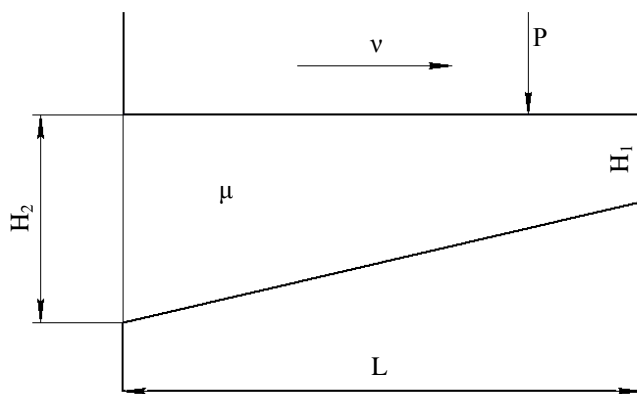


Рис. 1. Характерные параметры несущего профиля

Учитывая реверсивный характер движения поршня относительно внутренней поверхности гильзы, т.е. поршень при перемещении действует на гильзу с боковой силой и в конце каждого хода, переключаясь с ударом о стенку гильзы, меняет направление своего движения. Отсюда выступ микро-рельефа должен иметь две сопряженные наклонные плоскости (рис. 2). При этом высота выступа $H_{t\max}$ (мм) должна обеспечивать необходимый угол подъема наклонной плоскости для создания гидродинамического клина, поддерживающего жидкостное трение на всем пути движения поршня.

Согласно расчетной схеме, чтобы назначить рациональные шаго-высотные параметры микро-рельефа, которые смогут обеспечить минимальную, но достаточную ширину зазора H_1 для обеспечения жидкостного трения, необходимо определить высоту выступа $H_{t\max}$, длину выступа L , длины наклонных

плоскостей на прямом и обратном ходу поршня l_1 (мм) и l_2 (мм) для каждой зоны рабочей поверхности гильзы исходя из условий работы.

Тогда по расчетной схеме (рис. 2) длина выступа микрорельефа L , которая бы обеспечивала гидродинамический клин при реверсивном движении и необходимую маслосъемность поверхности:

$$L = l_1 + l_2. \quad (3)$$

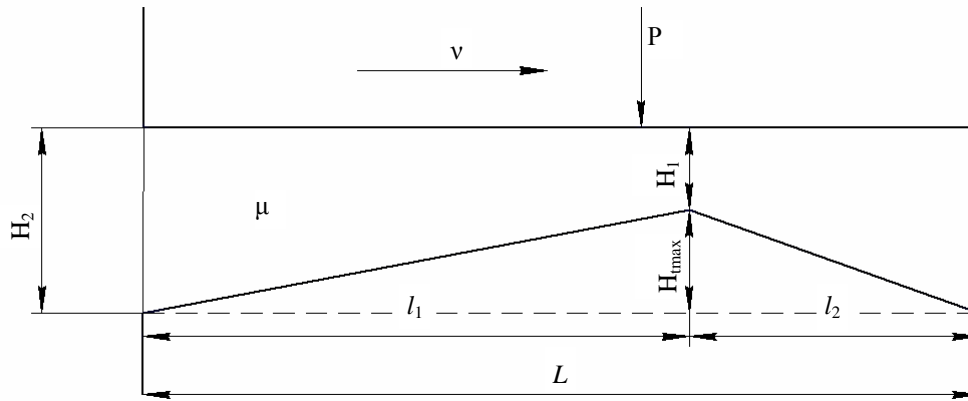


Рис. 2. Расчетная схема для микропрофилирования внутренней поверхности гильзы цилиндра

Учитывая неравномерности распределения сил по тактам рабочего цикла и используя наиболее энергоемкие такты – сжатие и расширение, соотношение работ которых составляет 17 % к 66 % соответственно, можно согласовать соотношение длин наклонных плоскостей l_1 и l_2 по правилу: большей работе должна соответствовать большая длина участка несущего профиля, то есть

$$\left(\frac{l_1}{l_2}\right) = \frac{66}{17}, \quad (4)$$

или, переходя к отношению длин, имеем

$$\frac{l_1}{l_2} = \sqrt{\frac{66}{17}}. \quad (5)$$

Общая длина выступа микрорельефа может быть выражена из уравнения Рейнольдса (2):

$$L = H_1 \sqrt{\frac{2P}{\mu v \delta}}. \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что с увеличением толщины масляной пленки H_1 и гидродинамической несущей способности (ГНС) P длина выступа микрорельефа L будет увеличиваться.

Толщина масляной пленки H_1 (входная ширина зазора) должна быть минимальная, но достаточная на всем пути движения поршня для создания режима жидкостного трения при выбранных шаго-высотных параметрах микрорельефа. Для определения ширины входного зазора H_1 было проанализировано большое количество зависимостей на основе расчета силы трения [4] и получено следующее выражение:

$$H_1 = \frac{\mu v S_{кон}}{fP}, \quad (7)$$

где f – коэффициент трения скольжения (для жидкостного трения $f = 0,001 \dots 0,003$); $S_{кон}$ – площадь контакта в сопряжениях ЦПГ, мм².

Для того чтобы толщина слоя смазки имела минимальное, но достаточное значение, при котором несущая способность не уменьшалась и значительно не увеличивалась, необходимо задаться постоянным значением высоты выступа микрорельефа H_1 (мм) по всей длине внутренней поверхности гильзы.

На основании литературных источников [5; 6] было выявлено, что при относительном перепаде высот $\delta = 1,2$ существует такая высота H_{max} , которая создает необходимый угол подъема наклонных плоскостей для создания гидродинамического клина при реверсивном движении поршня, с дальнейшим увеличением гидродинамической несущей способности.

Из выражения

$$\delta = \frac{H_2 - H_1}{H_1} \quad (8)$$

следует, что

$$H_{t \max} = \delta_{\max} H_1. \quad (9)$$

Однако постоянное увеличение ГНС приводит, во-первых, к росту расхода масла, его механического выброса, выгорания и испарения, во-вторых, к увеличению интенсивности контактирования деталей, вызывающей не снижение, а, наоборот, увеличение трения и изнашивания. К тому же пилообразная форма выступов может служить концентраторами напряжений, а в моменты уменьшения скорости движения (вплоть до нуля), они могут быть источниками повышенного изнашивания и возникновения задигов на поверхности поршня и поршневых колец. Поэтому первое приближение к реально существующей форме выступов микрорельефа – наклонные плоскости, сопряженные с плоским участком (рис. 3).

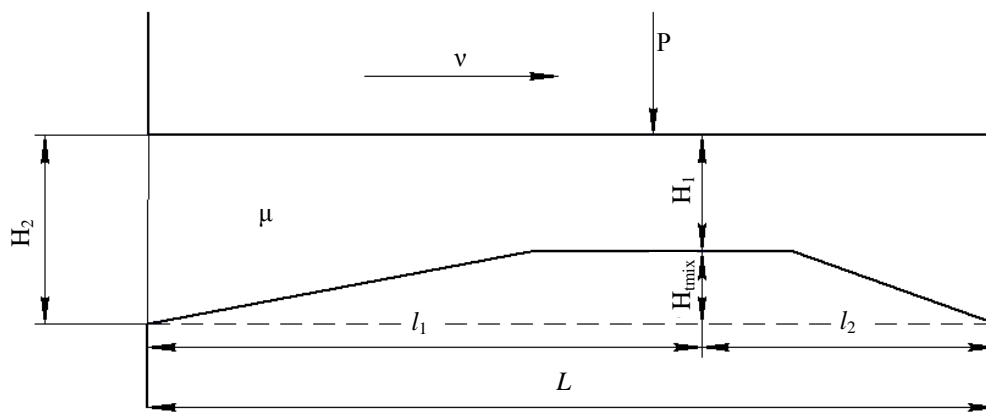


Рис. 3. Профиль выступа микрорельефа

Физический смысл наличия горизонтального удлинения в том, что этот участок призван воспринимать внешнюю нагрузку в моменты уменьшения (вплоть до нуля) скорости движения и поддерживать постоянный гидродинамический клин на всем пути движения поршня с углами подъема наклонных плоскостей, соответствующих высоте выступа $H_{t \max}$.

Из вышесказанного следует, что существует такое значение относительного перепада высот δ_{\min} , при котором параметр H_t должен принимать минимальное, но достаточное значение $H_{t \min}$ (мм) для создания жидкостного трения и обеспечения необходимой маслосъемности поверхности, предполагая минимальную толщину масляной пленки H_1 , то есть

$$H_{t \min} = \delta_{\min} H_1. \quad (10)$$

Тогда существует некоторый абсолютный перепад высот

$$\Delta = H_{t \max} - H_{t \min}. \quad (11)$$

В свою очередь абсолютный перепад высот Δ показывает, во сколько раз можно уменьшить высоту выступа H_t или значение относительного перепада высот, не уменьшив при этом максимальное значение ГНС и не изменив углы подъема наклонных плоскостей:

$$\Delta = \frac{H_{t \min}}{H_{t \max}} = \frac{\delta_{\min}}{\delta_{\max}}. \quad (12)$$

И с учетом выражений (9), (10) и (12) найдем $H_{t \min}$ по следующей формуле:

$$H_{t \min} = \frac{\delta_{\max} H_1^2}{\delta_{\max} H_1 + 1}. \quad (13)$$

Таким образом, решение системы из 5-ти уравнений ((3), (5), (6), (7), (13)) позволит определить основные соотношения шаго-высотных параметров микрорельефа, которые обеспечивают создание режима жидкостного трения в сопряжениях ЦПГ с минимальной, но достаточной маслосъемностью поверхности.

Технология нанесения выступов микрорельефа по расчетным шаго-высотным параметрам.

Комплексный подход предполагает нанесение микрорельефа лазерным излучением с последующей механической обработкой.

Быстрая кристаллизация из расплава, образованного высокоэнергетическими потоками (лазерные лучи), открывает новые возможности при поверхностной обработке деталей и позволяет получить как качественно иные структурные состояния в сплавах, так и микропрофиль любой сложности. При разработке технологии нанесения микрорельефа на внутреннюю поверхность гильзы с помощью лазерного излучения необходимо определить влияние энергетических характеристик лазерной обработки на размер зоны лазерного воздействия, а также ряда технологических параметров.

На размеры зоны обработки лазерным излучением будут влиять, во-первых, теплофизические величины: температура плавления материала T_{lig} (К), его теплопроводность λ_T (Вт/м·К), температуропроводность α (м²/с), плотность ρ (кг/м³), удельная теплоемкость материала (Дж/г·К); во-вторых, параметры лазерного технологического процесса: мощность излучения P_o (Вт); плотность потока, падающего на поверхность вещества q_s (Вт/м²); диаметр лазерного пучка на поверхности образца d_b (мм); скорость движения источника (м/с); длительность лазерного импульса τ_i (с). Для каждой конкретной марки металла теплофизические величины известны. Из оставшихся пяти параметров любые два являются независимыми и определяют значения оставшихся трех.

При определенных плотностях потока лазерного излучения ($q_s = 10^5 \dots 10^7$ Вт/см²) возникает только проплавление поверхностного слоя без последующего разрушения [7]. Движение расплава почти отсутствует. После окончания воздействия лазерного излучения расплав застывает, лунка не образуется, а, наоборот, профиль обработки выступает над поверхностью и имеет форму сферического сегмента.

Для определения параметров лазерного излучения воспользуемся [7; 8] уравнением теплового баланса:

$$AW_0 = W_T, \quad (14)$$

где W_T – теплосодержание разогретого объема вещества (Дж); W_0 – энергия источника теплоты, выделившаяся в объеме (Дж); A – поглощательная способность поверхностного слоя материала (%).

При этом энергию источника теплоты, выделившуюся в объеме, можно представить в виде

$$W_0 = q_s \tau_i \cdot \frac{\pi d_b^2}{4}. \quad (15)$$

С помощью уравнения теплового баланса можно определить количественную связь между глубиной прогрева до заданной температуры и параметрами лазерного излучения. При нагреве материала до температур, больших, чем температуры плавления, теплосодержание в объеме вещества определяется как [7]

$$W_T = \rho [c(T_{lig} - T_0)] \cdot \frac{\pi d_b^2 \cdot z_{lig}}{4}, \quad (16)$$

где T_0 – температура поверхности до воздействия лазерного излучения (К); z_{lig} – глубина проплавленного слоя (мм).

С учетом радиального распространения тепла $d_b + 2\sqrt{\alpha\tau_i}$ [7] будет определяться как

$$W_T = \rho [c(T_{lig} - T_0)] \cdot \frac{\pi (d_b + 2\sqrt{\alpha\tau_i}) \cdot z_{lig}}{4}. \quad (17)$$

Из выражения (17) можно при известной энергии лазерного импульса W_0 , длительности импульса τ_i и размере пятна фокусировки d_b определить глубину проплавления z_{lig} :

$$z_{lig} = \frac{4AW_0}{\rho [c(T_{lig} - T_0)] \cdot \pi (d_b + 2\sqrt{\alpha\tau_i})^2}. \quad (18)$$

С учетом выражения (15) уравнение (18) приобретает следующий вид:

$$z_{lig} = \frac{q_s A \tau_i d_b^2}{\rho [c(T_{lig} - T_0)] \cdot (d_b + 2\sqrt{\alpha\tau_i})^2}. \quad (19)$$

Для приближенного определения глубины слоя, прогретого до температуры плавления T_{lig} при лазерном нагреве поверхности металла, принимая во внимания данные литературных источников [7; 8], используется следующая формула:

$$z_{lig} = 2\sqrt{\frac{\alpha\tau_i}{\pi} - \frac{T_{lig}\lambda_T}{q_s}}. \quad (20)$$

Знание температурного поля материала при воздействии излучения лазера позволяет определить критические плотности потока, требуемые для достижения за данный промежуток времени в некоторой точке поверхности или объема материала заданной температуры. Используя одномерную модель нагрева полубесконечного тела $2\sqrt{\alpha\tau_i} \ll d_b$ тепловым источником с постоянной во времени плотностью потока, можно получить соотношения для расчета интенсивности, требуемой для достижения на поверхности температуры плавления [7]:

$$q_s^{lig} = \frac{0,885T_{lig}\lambda_T}{A\sqrt{\alpha\tau_i}}. \quad (21)$$

При движущемся источнике теплоты (поверхность или пучок движутся) теплосодержание в объеме определяется как [7; 9]

$$W_i = Vc\rho\Delta T = c\rho\tau_i v_{лаз} d_b z_T \Delta T. \quad (22)$$

Уравнение баланса в этом случае имеет вид (с учетом радиального расширения тепла) [7]:

$$A\frac{W_T}{\tau_i} = c\rho v_{лаз} (2\sqrt{\alpha\tau_i} + d_b) z_T \Delta T. \quad (23)$$

При высоких плотностях потока и в случае движущегося источника теплоты может осуществиться плавление и испарение вещества. Соответственно, уравнение баланса для режима плавления будет иметь следующий вид:

$$AP_0 = \rho v_{лаз} z_{lig} (2\sqrt{\alpha\tau_i} + d_b) \rho [c(T_{lig} - T_0)]. \quad (24)$$

Из выражения (24) можно вычислить скорость движения лазерного пучка по поверхности металла, зная глубину проплавленного слоя z_{lig} (выражение (20)).

$$v_{лаз} = \frac{A \cdot P_0}{\rho z_{lig} (2\sqrt{\alpha\tau_i} + d_b) \rho [c(T_{lig} - T_0)]}. \quad (25)$$

Выражение (25) справедливо в режиме непрерывного излучения лазера с мощностью P_0 . В этом случае время воздействия определяется как

$$\tau_i = \frac{d_b}{v_{лаз}}. \quad (26)$$

После окончания воздействия лазерного излучения расплав застывает, а профиль обработки имеет форму сферического сегмента. Сферический сегмент, полученный в результате проплавления поверхности, имеет поперечный размер, равный диаметру лазерного луча d_b . Высоту сегмента h (мм) можно найти по известной формуле:

$$h = R - \sqrt{R^2 - r_b^2}. \quad (27)$$

Здесь R – радиус условной сферы (мм), изображенной на рисунке 4.

При обработке с проплавлением поверхности геометрия нагрева материала имеет вид (рис. 5) [9]. В случае если диаметр пятна много больше, чем толщина прогретого слоя, этот слой имеет форму цилиндра. При этом высота получаемого цилиндра равна толщине проплавленного слоя z_{lig} . Тогда радиус условной сферы R можно найти по формуле:

$$R = \theta z_{lig}, \quad (28)$$

где θ – коэффициент пропорциональности, который зависит от материала и определяется эмпирически.

При оплавлении поверхности толщина проплавленного слоя находится из выражения (20) и (21):

$$z_{lig} = 1,13\sqrt{\alpha\tau_i}(1 - A). \tag{29}$$

Уравнение (27) приобретает следующий вид:

$$h = \theta \cdot 1,13\sqrt{\alpha\tau_i}(1 - A)\sqrt{(\theta \cdot 1,13\sqrt{\alpha\tau_i}(1 - A))^2 - r_b^2}. \tag{30}$$

Эта высота сферического сегмента h будет равна высоте выступа микрорельефа H_f . Размер поперечного сечения сегмента равен диаметру лазерного луча d_b .

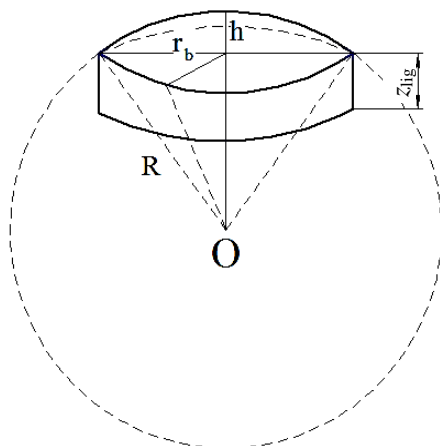


Рис. 4. Условная сфера для определения R

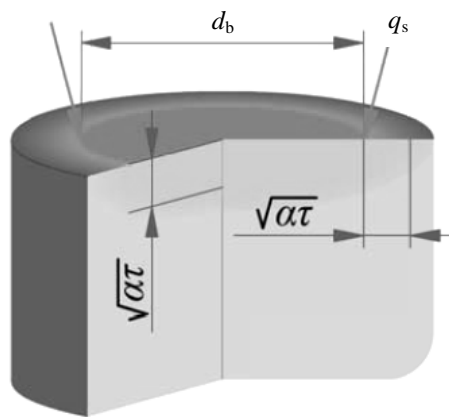


Рис. 5. Форма прогреваемого объема материала при воздействии широким лазерным пучком

Таким образом, чтобы получить выступ микрорельефа определенной высоты и диаметра из выражений (21), (25), (26) и (30), нужно найти параметры лазерного технологического процесса.

Способ нанесения выступов микрорельефа на внутреннюю поверхность гильзы. На основании полученных закономерностей был разработан способ нанесения выступов микрорельефа на внутреннюю поверхность гильзы лазерным излучением с последующей механической обработкой. Получение выступов профиля предполагает обработку внутренней поверхности гильзы по диаметру цилиндра лазерным излучением с проплавлением перекрывающимися дорожками с разной высотой оплава (рис. 6, а) с последующим их хонингованием до высоты выступа H_{min} (рис. 6, б).

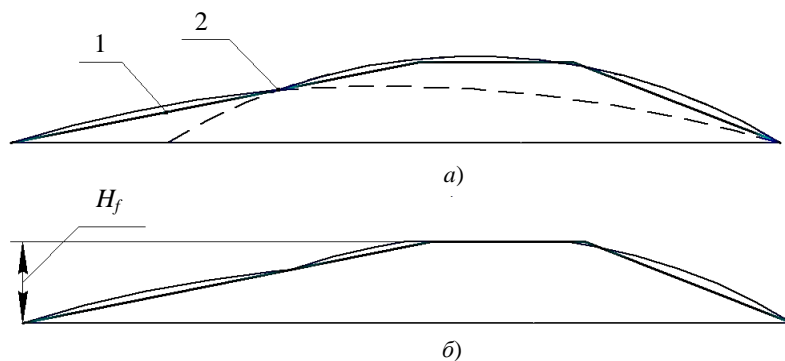


Рис. 6. Профиль выступа после оплавления поверхности (а):
1 – контур, заданный математической кривой; 2 – контур, полученный перекрывающимися дорожками;
профиль выступа после оплавления с последующим хонингованием (б)

Профиль выступа микрорельефа с заданными шаго-высотными параметрами можно получить, если обработку вести в следующей последовательности:

1) первоначально получить выступ высотой H_m (мм) и шириной w (мм), равной диаметру лазерного луча d_b . В свою очередь, ширина w равна длине выступа микрорельефа L , которая обеспечивает гидродинамический клин и необходимую маслоемкость поверхности (рис. 7);

2) учитывая соотношение длин l_1 и l_2 , необходимое для обеспечения гидродинамического клина при реверсивном движении, дальнейшее оплавление выступа ведется перекрывающей дорожкой на высоту H_{tmax} , которая обеспечивает нужный угол подъема наклонных плоскостей. При этом ширина дорожки $w_1 = L/2$ (рис. 8). Обработка ведется с нижнего края первоначального выступа микрорельефа относительно расположения гильзы в корпусе двигателя по диаметру внутренней поверхности гильзы с соответствующими характеристиками лазерного технологического процесса;

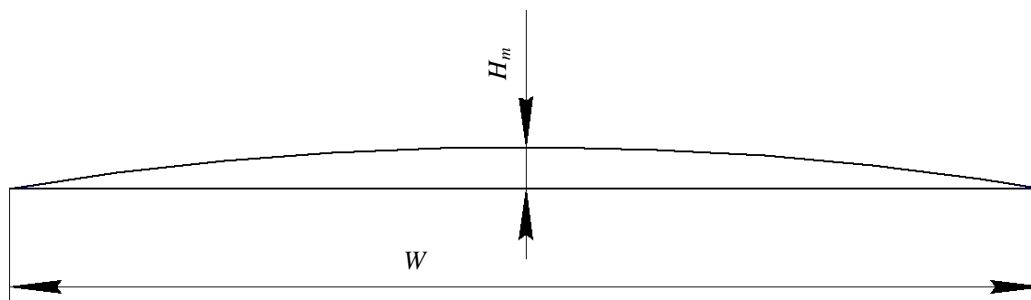


Рис. 7. Первоначальный профиль выступа микрорельефа

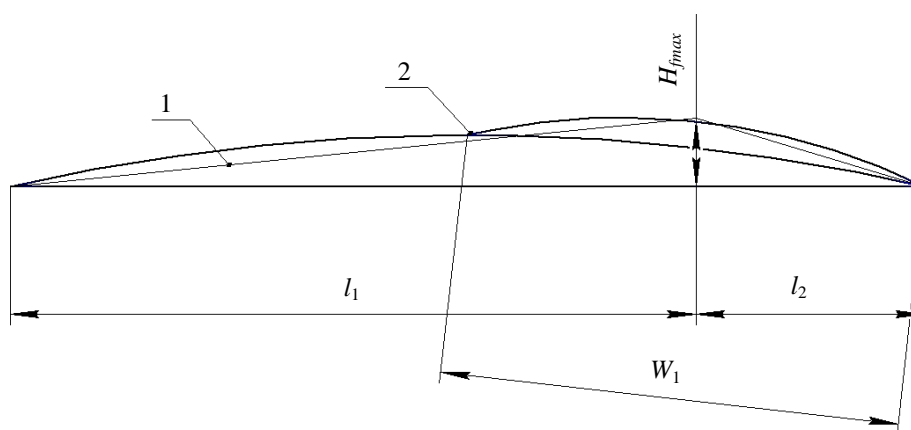


Рис. 8. Профиль выступа:

1 – контур, заданный математической кривой;

2 – контур, полученный перекрывающимися дорожками после оплавления поверхности

3) для создания жидкостного трения и обеспечения необходимой маслосъемности поверхности важным является также конечное значение высоты выступа микрорельефа. Поэтому последняя стадия обработки – это хонингование полученного лазерным оплавлением микрорельефа до высоты H_{tmin} (рис. 9). К тому же механическая обработка микрорельефа позволяет создать плоскость, параллельную направлению движения поршня, которая обеспечивает непрерывность слоя смазки и восприятия внешней нагрузки в моменты уменьшения (вплоть до нуля) скорости движения поршня.

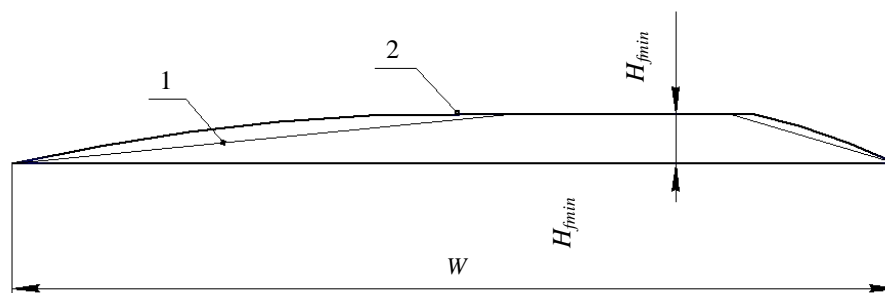


Рис. 9. Профиль выступа после оплавления лазерным излучением с последующим хонингованием:

1 – контур, заданный математической кривой;

2 – контур после предложенного способа обработки

Заключение. В результате проведенных исследований разработан способ нанесения микрорельефа на внутреннюю поверхность гильзы, который включает образование выступов оплавлением поверхности лазерным излучением с последующим хонингованием выступов микрорельефа до необходимой высоты. Определены с точки зрения максимизации гидродинамической несущей способности шаговысотные параметры микрорельефа, которые могут обеспечить минимальную, но достаточную ширину зазора в сопряжениях ЦПГ для обеспечения жидкостного трения.

Исследованы тепловые процессы лазерной обработки и установлены закономерности между параметрами микрорельефа и режимами лазерной обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шляхтов, В.А. Снижение износа цилиндропоршневой группы дизелей / В.А. Шляхтов // Энергодиагностика: междунар. конф. – М., 1995. – Т. 3. – С. 51.
2. Дьяченко, Н.Х. Теория двигателей внутреннего сгорания / Н.Х. Дьяченко, А.К. Костин, Г.В. Мельников. – М.: Машиностроение, 1965. – 457 с.
3. Дерягин, Б.В. Применение обобщенного закона трения к граничной смазке и механическим свойствам смазочного слоя / Б.В. Дерягин, В.П. Лазарев // Труды II конф. по трению и износу в машинах. – М.: Изд-во АН СССР, 1949. – Т. 3. – С. 43–55.
4. Боуден, Ф. Трение и смазка твердых тел / Ф. Боуден, Д. Тейбор. – М.: Машиностроение, 1968. – 503 с.
5. Путинцев, С.В. Гидродинамическое исследование и выбор параметров микрорельефа цилиндра двигателя / С.В. Путинцев, С.А. Аникин // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». Спец. вып. «Энергетическое и транспортное машиностроение». – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – С. 14–20.
6. Путинцев, С.В. Гидродинамическое исследование и выбор параметров микрорельефа цилиндра двигателя / С.В. Путинцев, П.Н. Антонюк, С.П. Чирский // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – С. 92–98.
7. Лосев, В.Ф. Физические основы лазерной обработки материалов: учеб. пособие / В.Ф. Лосев, Е.Ю. Морозова, В.П. Ципилев; Томск. политехн. ун-т. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2011. – 199 с.
8. Майоров, В.С. Исследование структуры и свойств сплавов при лазерной обработке и разработка технологии упрочнения промышленных изделий / В.С. Майоров, А.Н. Сафонов, В.М. Тарасенко // Применение лазеров в народном хозяйстве. Всесоюзная конференция: тез. докл. – Звенигород, 1985. – С. 156–159.
9. Григорьянц, А.Г. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / А.Г. Григорьянц. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 634 с.

Поступила 18.12.2014

CREATING MICRORELIEF ON THE INNER SURFACE OF THE CYLINDER LINER BY LASER RADIATION

V. KOSTRITSKI, A. LISOVSKI, A. DUDAN

Defined in terms of maximizing the hydrodynamic bearing capacity, stepper-altitude settings microrelief that can provide a minimum but sufficient width of the gap in the cylinder group mates for fluid friction; investigated the thermal processes of laser processing and correlations between parameters and modes microrelief laser treatment. The studies developed a method of applying the microrelief on the inner surface of the sleeve, which involves the formation of protrusions surface melting laser radiation followed by honing projections microrelief to the desired height.