Анализ **взаимосвязей зерен материала и субшероховатости** поверхности хромистой стали

М.Г. ШАЛЫГИН
канд. техн. наук
(ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»)

Рассмотрены поверхности на наноуровне. Проанализированы размеры зерен и субшероховатости стали 40х. Установлено наличие функциональной корреляции между размером зерен и субшероховатостью. В результате регрессионного анализа получены уравнения связи шага субшероховатости по средней линии и размера зерен материала стали 40х. Приведено общее уравнения связи шага субшероховатости и размеров зерна для различных сталей.
Ключевые слова: хромистая сталь, нанонеровности, зернистость, корреляция, регрессионный анализ, сканирующая микроскопия

Срок службы многих машин и механизмов во много обусловлен качеством поверхностного слоя трущихся деталей. Наличие на ответственных поверхностях деталей машин нанонеровностей в значительной степени обусловлено формой и расположением кристаллической решетки тел. Совокупности элементарных ячеек кристаллической решетки формируют зерна металлов, которые оказывают влияние на качество поверхностного слоя и, следовательно, на его физико-механические свойства при эксплуатации. Анализ связей нанонеровностей, которые принято называть субшероховатостью, и зернистостью материала позволит подойти к более четкому пониманию влияния зернистости материала на качество поверхностного слоя. Исследования проводились на плоских образцах, изготовленных из хромистой стали 40х с твердостью 48…53 HRC. Поверхность образцов подвергалась шлифованию и имела фактическую шероховатость *Ra* 0,4. Перед сканированием поверхности образцов очищали полярным и неполярным растворителем.

Ранее установлено, что вид механической обработки оказывает незначительное влияние на субшероховатость поверхности [1]. Для того, чтобы выявить взаимосвязь шага субшероховатости и размеров зерен требуется исследовать область на нанометровом уровне, что возможно на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ). При измерении субшероховатости на СЗМ кантилевер перемещаясь царапает поверхность образца и вычерчивает ее профиль, в то же время СЗМ позволяет считывать и другие параметры в процессе измерения профиля. Одним из таких параметров является фаза. В процессе измерения профиля кантилевер колеблется с определенной частотой. При этом посредством обратной связи колебания кантилевера фиксируются и гасятся. Когда кантилевер перемещается по разным фазам (дефектам, включениям и др.) амплитуда его колебаний различна. Это позволяет получить изображение структуры поверхности совместно с изображением ее профиля. На рис. 1 показана фазовая структура образцов, полученная на микроскопе Femtoscan. Выделение границ зерен проведено растягиванием оси OZ. Из рис. 1 видно, что наиболее четко отображены лишь границы крупных зерен, тогда как более мелкие зерна можно рассмотреть и измерить при более детальном

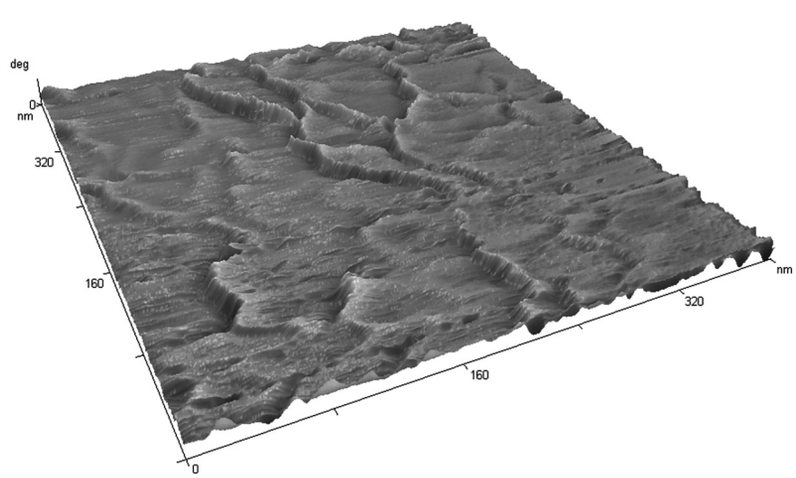
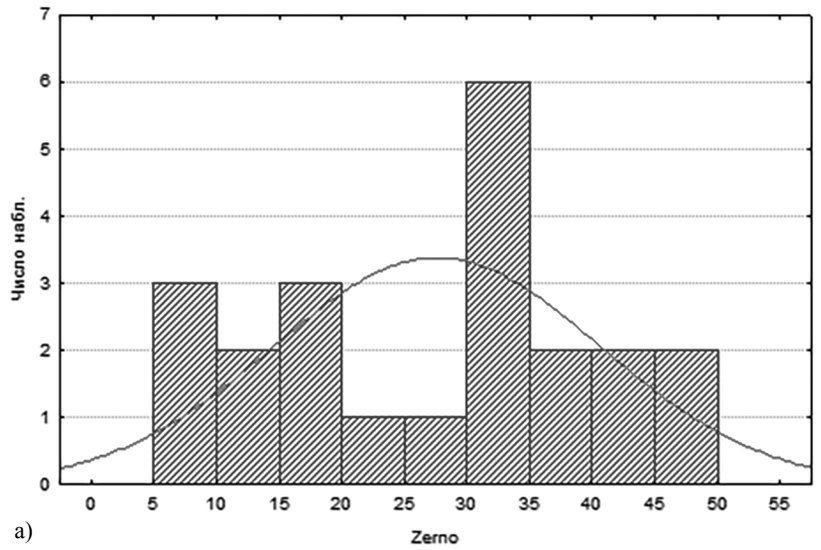
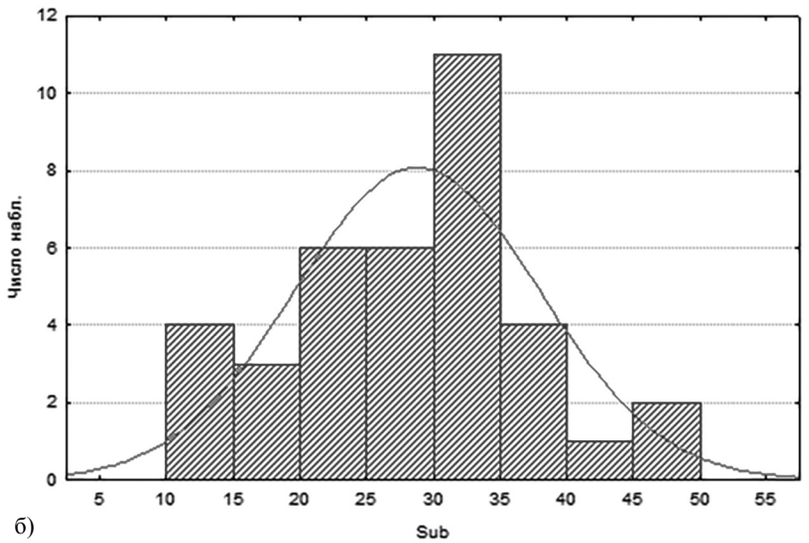


Рис. 1. Зерна стали 40х



а)



б)

Рис. 2. Гистограммы распределения измеренных значений для стали 40х: а – размеры зерен; б – шага субшероховатости по средней линии

увеличении. Гистограмма распределения размеров зерен приведена на рис. 2а.

Средний размер зерна на исследуемой поверхности составил $L_з=27,47$ нм. Профиль субшероховатости снимали с того же участка, что и фазовую структуру. Перед измерением субшероховатости применяли преобразование Фурье, фильтр Виннера, выравнивание сплайном. В связи с отсутствием нормированных параметров субшероховатости воспользуемся параметрами Rz_c, Sm_c предложенными в работе [2]. Гистограмма распределения значений шага субшероховатости по средней линии S_{mc} приведена на рис. 2б. Среднее значение шага субшероховатости по средней линии, измеренное в 6 сечениях, равно S_{mc}= 28,67 нм. На рис. 3 приведена профиллограмма субшероховатости и кривая подвода, полученная с поверхности образца стали 40х. На рис. 4 приведена диаграмма размаха.

В связи с тем, что структура материалов неоднородна, в которых присутствуют включения карбидов и остаточного аустенита (не более 10%), определение зернистости только по среднему значению не дает полной картины структуры материала. В этой связи, наиболее оптимальным является исследование взаимосвязи субшероховатости поверхности и зернистости материалов, основанное на анализе корреляционной связи шага субшероховатости и линейных размеров зерна, полученных в одном сечении.

С целью проверки гипотезы о наличии линейной корреляции между размерами зерен и шагом субшероховатости по средней линии были определены коэффициенты Кендалла и Спирмена на уровне значимости $p<0,05$. Так, коэффициенты Кендалла ($\tau_{40x}=0,130726$) и Спирмена ($R_{40x}=0,204578$) указали на отсутствие корреляции. С целью проверить гипотезу о вероятном наличии функциональной корреляции между исследуемыми параметрами был проведен регрессионный анализ и определен индекс корреляции.

Обработка полученных данных методами регрессионного анализа позволила выявить следующее уравнение связи зернистости стали 40х и субшероховатости поверхности

$$L_З = 27,4509 + 0,3689 \cdot e^{0,114113 \cdot S_{mc}}. \quad (1)$$

Анализ уравнения (1) показал на отсутствие зависимости зернистости материала от субшероховатости поверхности, что в целом является очевидным. Данное уравнение объясняет 56,5% вариации $L_з$ (индекс корреляции $R_{SL}=0,7729$). Анализ графика (рис. 4) показывает экспоненциальную зависимость зерна материала от субшероховатости поверхности, соответственно, величина размера зерна и скорость роста функции зерна прямо пропорциональны.

Проверить гипотезу об однородности генеральных совокупностей субшероховатости и зернистости представляется

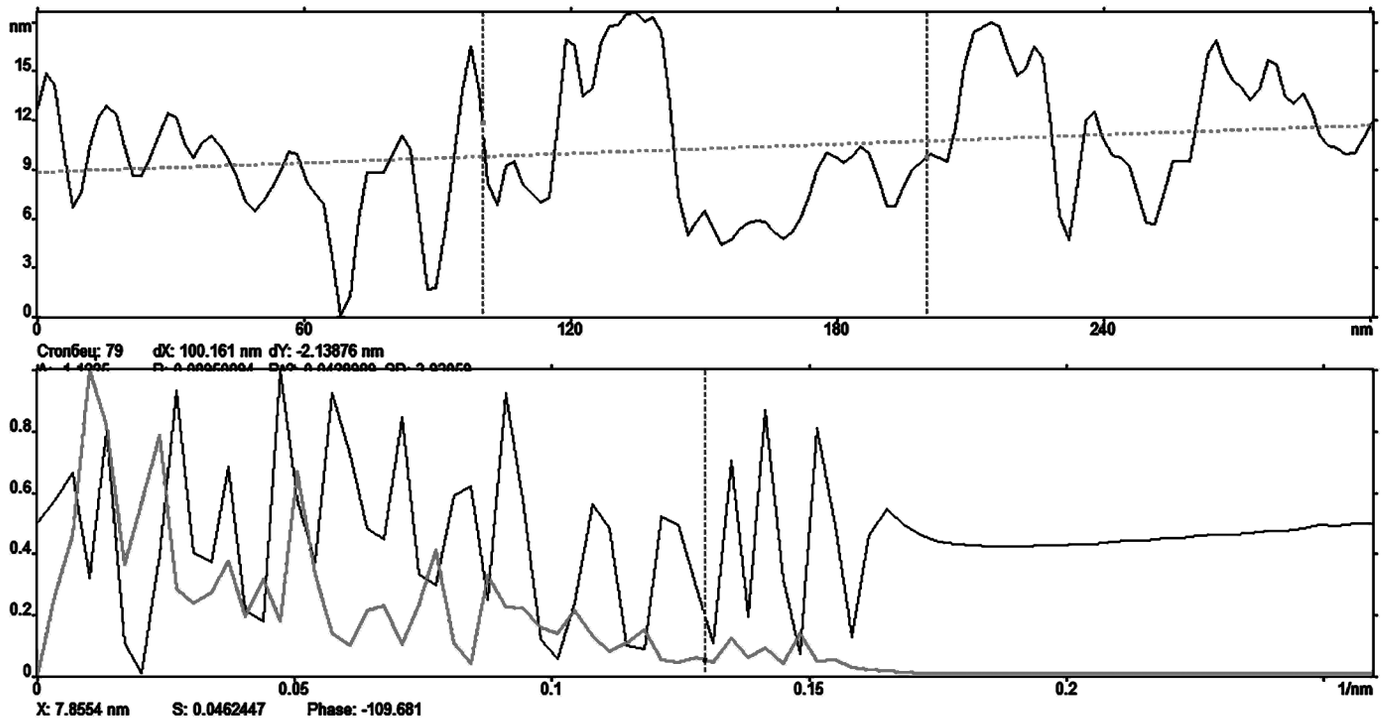


Рис. 3. Субшероховатость поверхности стали 40х

возможным с помощью критерия однородности Колмогорова-Смирнова (D_{40x}= =-0,237541; $p\text{-}level_{40x}$=0,001). Согласно данному критерию средний размер зерна и шаг субшероховатости по средней линии имеют однородные генеральные совокупности, таким образом, данные параметры не отличаются друг от друга по наблюдаемому признаку. То же утверждение подтверждает критерий Манна-Уитни (Z_{40x}=1,219172; $p\text{-}level_{40x}$=0,0007). Оба критерия подтвердили правильность выдвинутых гипотез, таким образом, можно принять во внимание, что шаг субшероховатости по средней линии и размеры зерен отличаются сдвигом на некую константу. Следует отметить, что приведенные выше критерии однородности не подтверждают выдвинутой гипотезы в случае положительного результата, они только указывают на то, что выдвинутые гипотезы отвергать не следует.

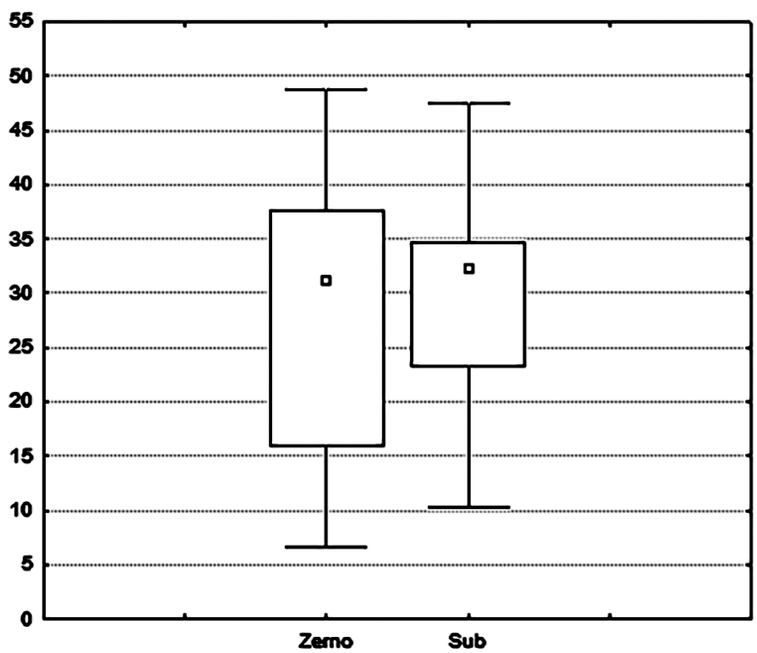


Рис. 4. Диаграмма размаха

Таким образом, субшероховатость не зависит от вида механической обработки, а зависит от зернистости материала. Проведенные корреляционный и регрессионный анализы позволяют с должной степенью доверия говорить о наличии функциональной взаимосвязи между зернистостью и субшероховатостью поверхности. Анализ уравнения регрессии (1) и уравнений регрессии для сталей 45 и 40х13 [3, 6, 7] показывает на близость коэффициентов при S_{mc}, что позволяет получить общее уравнение связи шага субшероховатости и размера зерен материала.

$$L_3 = 32.10810 + 0.20300 \cdot e^{0,11295 \cdot S_{mc}} . \quad (2)$$

Уравнение (2) объясняет 57,7% вариации $L_з$ (индекс корреляции $R_{SL}=0,7945$). Проведенные исследования подтверждают выдвинутое в работах [4, 5] предположение о наличии прямой взаимосвязи между размерами зерна материала и субшероховатостью поверхности деталей машин. Таким образом, можно достоверно утверждать, что размеры зерен влияют на параметры субшероховатости не менее, чем на 57%, в то время как вся остальная совокупность критериев оказывает влияние на формирование параметров субшероховатости не более чем на 43%.

Список литературы

1. Суслов А.Г., Шалыгин М.Г., Кузнецов С.В. Исследование поверхностей с различной механической обработкой на уровне субшероховатости // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2015. № 9. С. 45-47.

2. Инженерия поверхностей деталей / Колл. авт.; под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320с.

3. Суслов А.Г., Порошин В.В., Шалыгин М.Г., Кузнецов С.В. Взаимосвязь нанонеровностей (субшероховатости поверхности деталей и зернистости материала) // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2015. № 11. С. 3-6.

4. Суслов А.Г., Богомолов Д.Ю., Шалыгин М.Г. Усталостное изнашивание поверхностей трения на уровне субшероховатости // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. №4. С. 7-10.

5. Суслов А.Г., Порошин В.В., Шалыгин М.Г. Адгезионный износ поверхности трения на уровне субшероховатости // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. №7. С. 29-31.

6. Suslov A.G. and Shalygin M.G. The interrelation of the surface subroughness of martensitic steels with their granularity the quality of mechanical processing. AIP Conf. Proc. 1785, 040085 (2016).

7. Shalygin M.G. Correlation between Nano-Roughness with Grains of Austenitic Steel and Machining Quality // J. Fundam. Appl. Sci., 2016, 8(3S), 2835-2841.

Shalygin M.G., candidate of technical Sciences, associate Professor, DEP. "Quality management, standardization and metrology", «Bryansk state technical University», Bryansk

Analysis the correlation grain of material and subrourhness surface for chromic steel

Was analyzed the surface at the nanoscale. Was spent the analyzed of grains size and subroughness for steel 40X. Received the presence of a functional correlation between the grains size and subroughness. In the result of the regression analysis the equation of connection of the step of subroughness in the midline and the grains size of the material for steel 40X. Presented the general equations relating step subroughness and the grains size for the different steels.

Key words: chromic steel, nanoroughness, grain size, correlation, regression analysis, scanning microscopy.

СДМ