

УДК 539.383, 539.5

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО РЕЛЬЕФА НА ПОВЕРХНОСТИ
КАРБИДОСТАЛЕЙ – КАРБИД ВОЛЬФРАМА – ЖЕЛЕЗОМАНГАНЦЕВАЯ СТАЛЬ**

Е.В. Абдульменова, И.Н. Севостьянова, Т.Ю. Саблина

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. С.Н. Кульков

Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН,

Россия, г. Томск, пр. Академический 2/4, 634055

E-mail: Ekaterina.V.Abdulmenova@yandex.ru

**STUDY OF DEFORMATION RELIEF ON THE SURFACE OF CEMENTED STEELS - TUNGSTEN
CARBIDE - IRON-MANGANESE STEEL DURING AXIAL COMPRESSION**

E.V. Abdulmenova, S.N. Sevostyanova, T.Yu. Sablina

Scientific Supervisor: Prof., Dr. S.N. Kulkov

Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch Russian Academy of Sciences Russia,

Tomsk, pr. Akademicheskii 2/4, 634055

E-mail: Ekaterina.V.Abdulmenova@yandex.ru

***Abstract.** The evolution of the deformation relief on the surface of samples of cemented steels WC - (Fe-Mn-C) during axial compression tests was studied. It was found that in the process of deformation of carbide steels on the polished end surface, an ordered deformation macro-relief in the form of bands of localized deformation is formed. The bands are oriented in two directions and propagate independently of the material structure. With an increase in the average distance between the bands, the compressive strength and ultimate deformation before fracture decrease. It is shown that the values of the fractal dimension of the profile of the deformed surface increase with increasing deformation and depend on the average distance between the bands of localized deformation.*

Введение. Процесс деформирования твердого тела почти всегда сопровождается появлением деформационного рельефа на свободных поверхностях материалов. Его формирование связывают с локализацией деформации на разных масштабных уровнях и процессами предразрушения материала [1]. При этом его формирование наблюдают на монокристаллах, пластичных и малопластичных металлах и сплавах. В [2] исследованы физико-механические свойства карбидосталей WC-(Fe-Mn-C), содержание марганца в связующей фазе которых менялось от 4 до 18 вес.%. Показано, что наряду с высокими значениями предела прочности при осевом сжатии в карбидосталях наблюдаются высокие значения предельной деформации до разрушения. Однако подробного анализа, возникающего на свободных поверхностях образцов карбидосталей деформационного рельефа проведено не было. Существующие способы описания деформационного рельефа основаны на методах стереометрического и фрактального анализа [3, 4] позволяющие провести как количественную оценку возникающих на деформируемой поверхности структурных элементов рельефа, так и охарактеризовать структуру поверхности единым параметром – фрактальной размерностью D_f .

Целью работы является установление взаимосвязи деформационного рельефа, формирующегося на поверхности образцов, и механическими свойствами карбидосталей WC-(Fe-Mn-C).

Экспериментальная часть. В работе исследованы карбидостали 80 об.% WC – сталь Fe-Mn-C. Содержание марганца в связующей фазе изменяли от 4 до 18 вес.%. Технология получения карбидосталей описана в работе [2]. Средний размер карбидного зерна композита составлял $2,4 \pm 0,2$ мкм, а средний размер межкарбидных прослоек равен $1,7 \pm 0,2$ мкм, пористость при этом не превышала 0,5 %. Испытания на осевое сжатие проводили на образцах прямоугольного сечения 4×4 мм, высотой 7 мм с полированной боковой гранью на испытательной машине INSTRON-1185 со скоростью нагружения 0,1 мм/мин. Предел прочности при осевом сжатии (σ_c) уменьшался с 4100 до 3500 МПа, а предельная деформация до разрушения с 6,2 до 4,3 % с увеличением содержания марганца в стальной связке. Ступенчатое нагружение сжатием (через каждые 100 МПа) проводили образцах карбидостали с содержанием 4 % марганца в связке. Металлографический анализ проводили на оптическом микроскопе "НЕОРНОТ- 21" в прямом и косом освещении или на растровом электронном микроскопе VEGA Tescan 3 SBH. Среднее расстояние между полосами локализованной деформации определяли методом секущих [3]. Фрактальный анализ деформируемой поверхности проводили на растровом электронном микроскопе VEGA Tescan 3 SBH по методике, описанной в [4].

Результаты. Металлографические исследования торцевой полированной поверхности карбидосталей с 4 % марганца в связующей фазе в процессе ступенчатого нагружения показали, что при уровне напряжений от 700 до 1700 МПа одновременно наблюдаются деформация отдельных, крупных участков связки, проявляющихся в виде рельефа между карбидными зёрнами и появления на некоторых крупных карбидных зёрнах полос скольжения. В области напряжений 1700 – 2200 МПа происходит увеличение количества пластически деформированных карбидных зёрен, причем в процесс деформации вовлекаются зёрна меньшего размера, появление единичных трещин по границе раздела карбид – связка. При увеличении напряжений выше 2700 МПа в структуре карбидостали наблюдается разрушение карбидных зёрен, формирование множественных микротрещин размерами от 2 до 15 мкм, а на поверхности карбидосталей наблюдаются мезо-полосы локализованной деформации, рис. 1, а. Они ориентированы в двух направлениях и распространяются независимо от внутренней структуры материала в направлении максимальных касательных напряжений, под углом примерно 45° к оси нагружения. Взаимное пересечение полос локализованной деформации приводит к фрагментации всей поверхности деформируемого образца.

Изменение фрактальной размерности профиля деформируемой поверхности (D_f) карбидостали с 4% марганца в связке в процессе ступенчатого нагружения образца в зависимости от приложенного напряжения показано на рис. 1, б. Из рисунка видно, что до напряжений 2700 – 2800 МПа фрактальная размерность практически не изменяется, а затем наблюдается резкий рост D_f . По данным металлографических исследований с увеличением напряжений выше 2700 МПа на деформируемой поверхности происходит формирование деформационного рельефа. То есть, увеличение фрактальной размерности напрямую связано с появлением на деформируемой поверхности карбидосталей структурных изменений в виде полос локализованной деформации.

На рис. 1, в показана корреляционная зависимость среднего расстояния между мезо-полосами локализованной деформации, посчитанная перед разрушением карбидосталей с разным содержанием

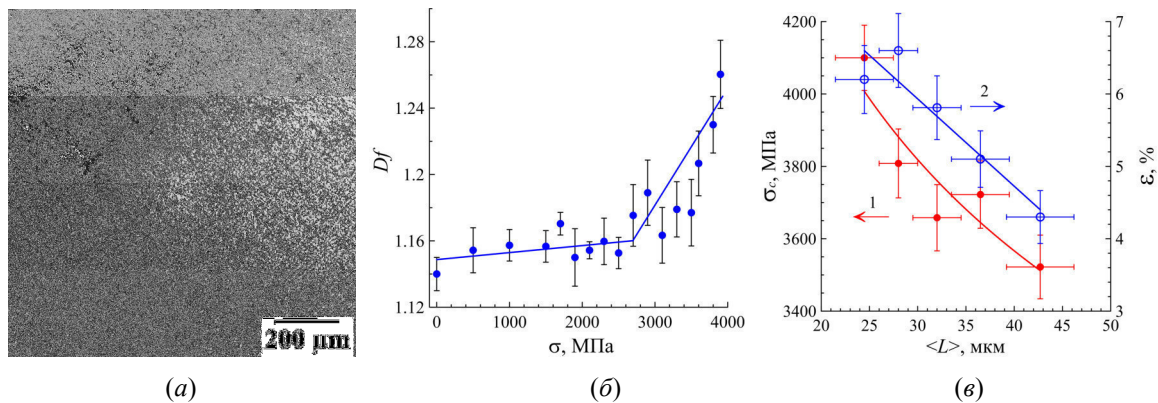


Рис. 1. Металлографическое изображение деформационного рельефа на поверхности карбидостали при деформации (а); изменение фрактальной размерности с увеличением приложенного к образцу напряжения (б); изменение среднего расстояния между полосами локализованной деформации от предела прочности при сжатии (кривая 1) и предельной деформации до разрушения (кривая 2) (в)

марганца в связующей фазе и механическими свойствами карбидосталей. Видно, что чем меньше среднее расстояние между полосами локализованной деформации, тем выше значения предела прочности при сжатии (σ_c) и предельной деформации до разрушения (ε).

Заключение. Процесс деформации карбидосталей WC-(Fe-Mn-C) сопровождается формированием на торцевой полированной поверхности деформационного рельефа в виде полос локализованной деформации. Показано, что изменение фрактальной размерности напрямую связано с процессами локализации деформации при уровне напряжений выше 2700 МПа. При этом, чем меньше среднее расстояние между полосами локализованной деформации, тем выше механические свойства карбидосталей.

Результаты получены при выполнении комплексного проекта "Создание высокотехнологичного импортозамещающего производства полного цикла металлорежущих сложнопрофильных многогранных твердосплавных пластин для приоритетных отраслей промышленности" (соглашение о предоставлении субсидии от 27.11.2019 № 075-11-2019-036), реализуемого ИФПМ СО РАН при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках постановления Правительства РФ от 09.04.2010 № 218.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В. Физическая мезомеханика деформируемого твердого тела как многоуровневой системы. I. Физические основы многоуровневого подхода // Физическая мезомеханика. – 2006. – Т.9., №3. – С. 9-22.
2. Севостьянова И.Н., Саблина Т.Ю., Федоров Д., Голуб А., Кульков С.Н. Исследование фазового состава и его влияние на механические свойства карбидосталей WC-(Fe-Mn-C) // Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). – 2020. – Т. 22., № 2. – С. 76–88.
3. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1976. – 270 с.
4. Буюков А.С., Зенкина Ю.А., Буюкова С.П., Кульков С.Н. Фрактальная размерность поверхности разрушения пористого $ZrO_2 - MgO$ композита // Перспективные материалы. – 2020 – № 1. – С. 74-82.