

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СМАЗКИ ЦИАТИМ 221

А. В. Нечаева

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

Антифрикционная термостойкая смазка ЦИАТИМ 221 производится на основе кремнийорганической жидкости, загущенной комплексным кальциевым мылом с добавлением антиокислительной присадки. Смазка предназначена для смазывания подшипников качения, систем управления и приборов с частотой вращения до 10 000 мин⁻¹, агрегатных подшипников летательных аппаратов, узлов трения и сопряженных поверхностей «металл-металл» и «металл-резина», работающих в вакууме, при остаточном давлении 666.5 Па. Ее так же применяют при проведении профилактики персональных компьютеров, для смазывания шариковых подшипников в вентиляторах. В соответствии с ГОСТ 9433-80 диапазон рабочих температур составляет от -60 до +150 °С, эффективная вязкость при температуре -50 °С и среднем градиенте скорости деформации 10 с⁻¹ не более 800 Па•с, предел прочности не менее 120 Па [1].

Одним из допущений классической гидродинамической теории смазки, как теоретического фундамента для расчёта динамики трибосопряжений, является предположение о том, что смазочный материал подчиняется реологическому закону Ньютона [2]:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}.$$

Здесь η – динамическая вязкость, τ – напряжение сдвига, $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига. Ньютоновская реологическая модель смазочного материала положена в основу многих инженерных методик расчёта подшипников скольжения. Однако, известно, что реологическое поведение реальных смазок является сложным и может отклоняться от простого линейного закона. Наиболее известными отклонениями, называемыми в литературе неньютоновскими свойствами, являются: зависимость вязкости от скорости сдвига, от величины зазора; влияние на вязкость структурных неоднородностей; релаксация касательных и появление нормальных напряжений в смазочном слое (вязкоупругость). Экспериментальное исследование реологических характеристик смазки ЦИАТИМ 221 и является целью настоящей работы.

Измерения выполнены на ротационном реометре *Physica MCR 501*. Для определения реологических характеристик исследуемого образца использовалась система «конус-плита». Диаметр конуса $d = 25,976$ мм, угол $\alpha = 1,001^\circ$. Такая геометрия обеспечивает однородность градиента скорости в измерительном зазоре. Для поддержания температурного режима использовалось специальное температурное устройство *H-PTD 200* на основе эффекта Пельтье.

В ходе эксперимента на рабочую поверхность плиты реометра помещалось около 0.47 мл образца. Далее задавались начальное и конечное значения скорости сдвига, время эксперимента и необходимый температурный режим.

На рисунке 1 показаны типичные зависимости касательных напряжений и эффективной вязкости от скорости сдвига.

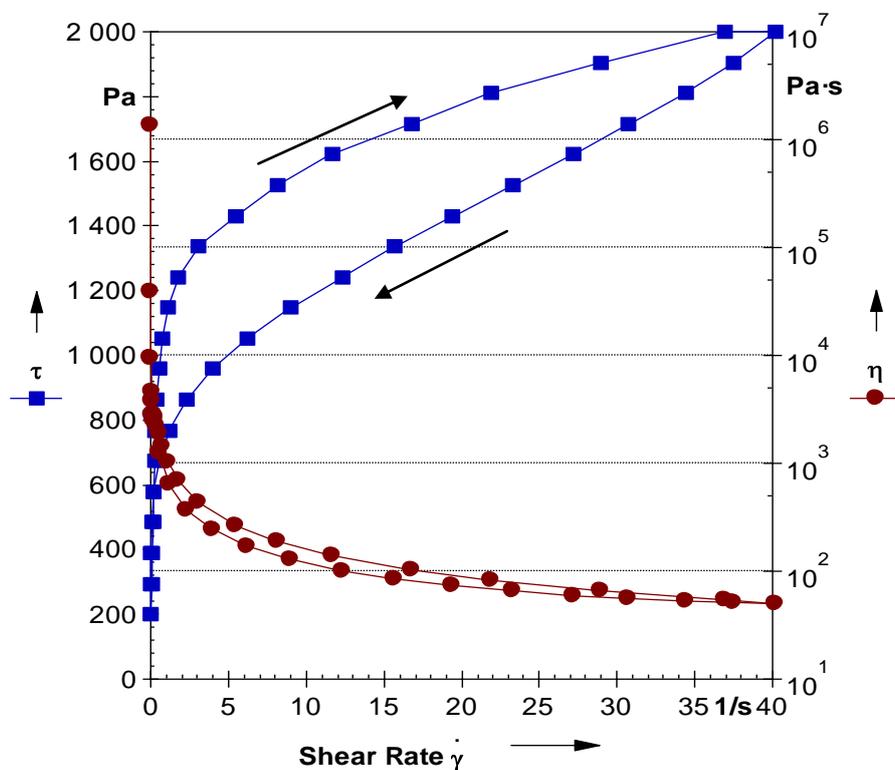


Рис. 1. Зависимость касательных напряжений τ и эффективной вязкости η от скорости сдвига. $T = -10^\circ\text{C}$

Аналогичные зависимости были измерены в температурном диапазоне от -20 до 80 °С. Анализ кривых течения показывает, что смазка является типичной неньютоновской средой и обладает предельными напряжениями сдвига, иначе пределом текучести. Наличие предельных напряжений сдвига свидетельствует о том, что вещество обладает структурой, достаточно жесткой, чтобы сопротивляться любому напряжению, не превосходящему по величине это предельное напряжение. Если напряжение превышает предельное напряжение сдвига, то структура начинает разрушаться и система ведет себя как обычная вязкая среда.

Предел текучести является "положительным" качеством смазки, обеспечивающим способность оставаться в зазоре трибосопряжений. Зависимость начальных напряжений сдвига от температуры показана на рисунке 2. Такую зависимость можно приближенно описать экспоненциальной функцией.

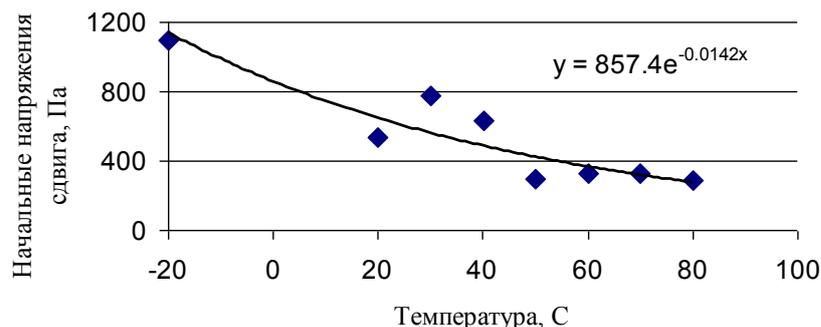


Рис. 2. Зависимость начальных напряжений сдвига от температуры

Эффективную вязкость от скорости сдвига выше предела текучести можно описать уравнением Виноградова-Малкина [3]. Параметры уравнения в зависимости от температуры представлены в таблице.

Т, °С	Аппроксимационное уравнение	Т, °С	Аппроксимационное уравнение
-20	$\eta = \frac{4187.7}{1 + 2.68 T^{1.05} - 0.006 T^{2.1}} + 16.09$	50	$\eta = \frac{-3.7 E + 7}{1 - 61282 T^{0.9} + 67.57 T^{1.8}}$
20	$\eta = \frac{-98.12}{1 - 131.24 T^{0.9} + 0.0134 T^{1.8}} + 3.34$	60	$\eta = \frac{-2.1 E + 8}{1 - 385990 T^{0.94} + 164.6 T^{1.88}} + 0.99$
30	$\eta = \frac{1990.7}{1 + 2.35 T^{0.969} - 0.00081 T^{1.94}} + 2.49$	70	$\eta = \frac{-2.39 E + 7}{1 - 48102 T^{0.93} + 24.05 T^{1.86}} + 0.866$
40	$\eta = \frac{917}{1 + 1.05 T^{1.04} - 0.00025 T^{2.08}} + 2.03$	80	$\eta = \frac{-170890}{1 - 129.8 T^{0.48} - 255.9 T^{0.96}} + 0.834$

Другой особенностью смазки является проявление тиксотропных свойств. Тиксотропная жидкость характерна тем, что имеет возможность восстанавливать свою структуру всякий раз, когда она остается в покое в течение достаточно продолжительного периода времени. На рисунке 1 "верхняя" кривая течения, измеренная при постепенном увеличении скорости сдвига, не совпадает с "нижней кривой", измеренной при постепенном уменьшении скорости сдвига. Они образуют так называемую "петлю гистерезиса", площадь которой может использоваться в качестве количественной характеристики тиксотропии.

Наличие предельных напряжений сдвига и тиксотропия дают основание предположить, что смазка обладает вязкоупругими свойствами. Используемый в опытах реометр позволяет измерять не только вязкие, но и упругие характеристики образцов. Для этого используется колебательный режим, когда верхний измерительный конус не вращается, а совершает колебательные движения с заданной амплитудой $\dot{\gamma}_0$ и частотой ω . Если изменение $\dot{\gamma}$ происходит по гармоническому закону $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0 S \omega t$, то

$\tau = \eta \omega \gamma_0 \sin(\omega t + \delta)$. В соответствии с этим, если сдвиг фаз находится в пределах от $0 < \delta < 90$, то тело называется вязкоупругим [4].

На рисунке 3 показана температурная зависимость комплексного модуля и угла сдвига фаз исследуемого образца.

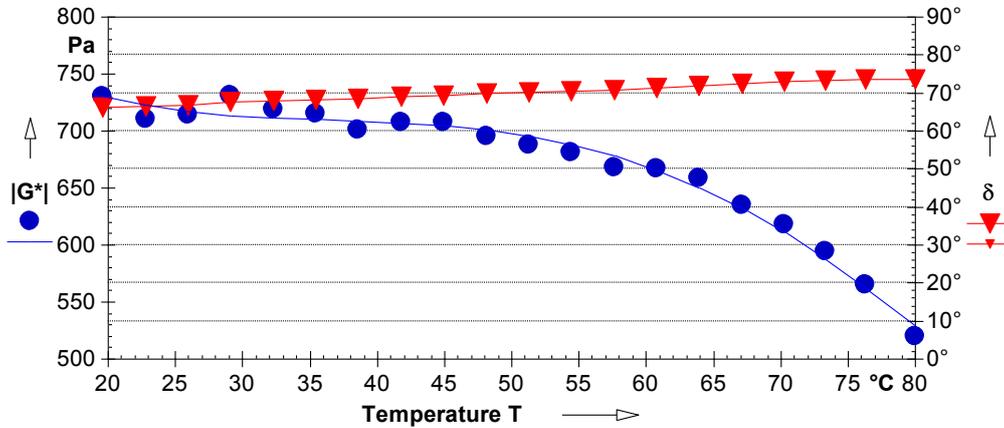


Рис. 3. Вязкоупругие характеристики смазки

Как видно из рисунка исследуемый образец проявляет вязкоупругие свойства во всем исследованном температурном интервале. Здесь комплексный модуль G^* , равный отношению амплитуды деформации к амплитуде напряжений, представляет собой общее сопротивление образца приложенной деформации.

Зависимость эффективной вязкости смазки от температуры показана на рисунке 4. Температура в эксперименте изменялась от -20 до 80 °C, скорость сдвига была постоянна и равнялась 10 c^{-1} .

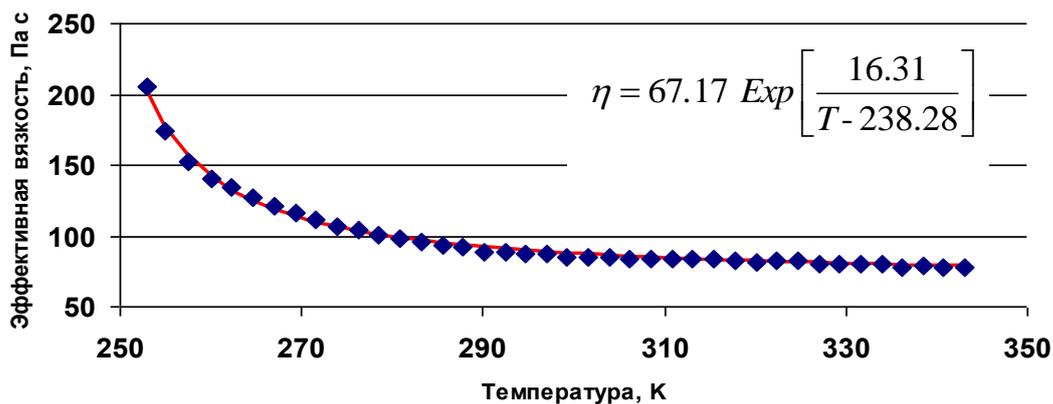


Рис. 4. Температурная зависимость эффективной вязкости смазки ЦИАТИМ 221. Точки – эксперимент, линия – аппроксимационная зависимость

Экстраполяция аппроксимационной зависимости на значение $T = -50$ °C дает значение эффективной вязкости $\eta \approx 1000$ Па с, что не соответствует ГОСТ 9433-80.

Список литературы

1. ГОСТ 9433-80. Смазка ЦИАТИМ-221. Технические условия. Дата введения 1982-01-01. 14 с.
2. Уилкинсон У. Л. Неньютоновские жидкости. Мир, Москва. 1964. 216 с.
3. Виноградов Г. В., Малкин А. Я. Реология полимеров. Москва, Химия, 1977. 440 с.
4. Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии. Москва, КолосС, 2003. 312 с.